

ISSN **2359-6457**

37ª Edição

 **Incitel**

Congresso de Iniciação Científica do Inatel

04 A 06
JUNHO | 2025

Apoio:

Realização:

 inatel.br/incitel


FAPEMIG

 **CNPq**
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico


SBC
Sociedade Brasileira de Computação

Inatel

Mensagem da coordenação

Foi com grande satisfação que recebemos vocês, pesquisadores, para o **Incitel 2025**, um evento promovido pelo Instituto Nacional de Telecomunicações. Neste ano, as sessões ocorreram de forma híbrida, com apresentações de trabalhos tanto presenciais quanto online. Este encontro tem como principal objetivo promover a troca de ideias, informações e experiências nas mais diversas áreas da ciência.

A organização de um congresso é uma tarefa desafiadora e, por isso, gostaria de expressar meus agradecimentos aos alunos e estagiários Kevin Lopes do Vale e Nicolas Mokarzel Carneiro. Estendo também meus sinceros agradecimentos à equipe da Assessoria de Comunicação e Marketing (ASCOM), do Centro de Registros Acadêmicos (CRA), da Coordenação de Cursos e do Inatel Cultural, pelo empenho e dedicação ao sucesso deste projeto.

Esperamos que todos tenham tido um excelente congresso!



Prof.^a Karina Perez Mokarzel Carneiro
Coordenadora Geral – Incitel 2025

I373

Incitel 2025 – Congresso de Iniciação Científica do Inatel (2025:
Santa Rita do Sapucaí - MG)

Anais do 37º Congresso de Iniciação Científica do Inatel – Incitel,
04 a 06 de junho 2025, Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, Brasil.
Publicado por Karina Perez Mokarzel Carneiro (Org.). – Santa Rita
do Sapucaí - MG: Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL,
2025.

Modo de acesso: <https://inatel.br/incitel/> (Anual)
ISSN 2359-6457

247 p. il.

1. Engenharia – I. Título. II. CARNEIRO, Karina Perez Mokarzel.
III. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

CDU – 621

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário da Instituição
Paulo Eduardo de Almeida CRB6-2718

Catálogo Sistemático

Engenharia Biomédica	CDU – 57.089
Engenharia da Computação	CDU – 004.41
Engenharia de Telecomunicações	CDU – 621.39
Engenharia de Controle e Automação	CDU – 681.5
Engenharia de Produção	CDU – 658.5
Empreendedorismo	CDU – 658.3

SESSÕES

Sessão Técnica 1 – Biomédica I

Avaliação de Técnicas de Calibração para um Software de Eye Tracking

..... 01
Rita Elizabeth Santos de Almeida, Isadora Coelho Faggiani, Leonardo Ribeiro Silva, Ana Clara Santos, Marcelo Vinícius Cysneiros Aragão, Juliano Augusto Nascimento Leite

Desenvolvimento de aplicativo de teste de trilhas para avaliação da aprendizagem motora em idosos

..... 13
Victor Arruda Gorgal, Elisa Renno Carneiro Dester, Luma Rissatti Borges do Prado, Rita Elizabeth Santos de Almeida

Agnos: Plataforma para Detecção de Alzheimer por meio de Redes Neurais Convolucionais e Ressonância Magnética

..... 18
Raquel Andrea Calderon Gallard, Maria Rene Ledezma Flores

Avaliação dos níveis de estresse e ansiedade em estudantes de Engenharia Biomédica da Universidade Privada de Valle Cochabamba

..... 24
Brayan Javier Mejia Saavedra, Sergio Vasquez, Marcelo Cruz, Melissa Andrea Herrera Tambo

Sessão Técnica 2 – Controle e Automação I

Estudo para Desenvolvimento de um Robo de Combate para a Categoria Bettleweight – 1,36kg (3lb)

..... 29
Eugenio M. J. da Silva, Julia Botrovas Alves, Alexandre Baratella Lugli, Wanderson E. Saldanha, Egidio Raimundo Neto, Gabriel de Souza Pivoto

Técnicas de Programação Aplicadas ao Desenvolvimento da Robótica Utilizando a Simulação de Futebol

..... 33
Eugenio M. J. da Silva, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Eduardo A. F. Rezende, Gustavo M. Silva, Luiz Fernando D. R. dos Santos, Wanderson E. Saldanha

Estudo Sobre Métodos de Programação de um Robô para a Categoria Sumô LEGO®

..... 37
Luiz Fernando D. R. dos Santos, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Eugenio M. J. da Silva, Luiz Gustavo de Oliveira Costa, Wanderson E. Saldanha

Estabelecimento de Chave Criptográfica utilizando Características do Canal sem fio como Segredo

..... 42
João Gabriel Ferreira Ribeiro, Ítalo Augusto de Sousa Tacca, Guilherme Pedro Aquino, Luciano Leonel Mendes, Vanessa Mendes Rennó

Sessão Técnica 3 – Computação e Telecomunicações I

Otimização da Energia Coletada por Dispositivos IoT em Sistemas WET

..... 48
Natalia Pereira Batista, Victoria Dala Pegorara Souto

Validação e otimização de sistemas IoT de monitoramento e alertas aplicados em ambiente hospitalar

..... 54
Felipe Silveira Barbosa, Filipe Bueno Vilela, Luma Rissatti Borges do Prado, Marcos Henrique Barbosa Pereira

Superfície Reconfigurável Inteligente: Transmissão de Sinais Fora da Linha de Visada Direta

..... 60
John Sugahara, Pedro H. C. de Souza, Luciano Leonel Mendes

Técnicas de Múltiplo Acesso Associadas ao Uso de Inteligência Artificial para as Redes Móveis de Sexta Geração

..... 64
Matheus Braga Teixeira, Daniely Gomes Silva, Mariana Baracat de Mello, Luciano Leonel Mendes

Sessão Técnica 4 – Biomédica II

Desenvolvimento de dispositivo para avaliação de saúde bucal

..... 80
Thomas Ceccon Guimarães, Elisa Renno Carneiro Dester, Luma Rissatti Borges do Prado, Rita Elizabeth Santos de Almeida

Sistema de Interface Acessível para Comunicação e Automação Residencial a Pessoas com Esclerose Lateral Amiotrófica

..... 84
Nathalia Ap. Al. Costa, Vitor T. Gonzaga, Elisa Renno Carneiro Dester, Filipe Bueno Vilela, Rita Elizabeth Santos de Almeida

Conceção de uma cabina estéril automatizada para o cultivo de amostras biológicas

..... 89
Rocío Isabel Miranda Zamora

Biofilme da pele de Tilápia (*Oreochromis niloticus*) para o tratamento de queimaduras

..... 95
Mikaela Pantoja Rocabado, Erika Fernández Terrazas

Sessão Técnica 5 – Computação e Software I

Tendências do Uso de Inteligência Artificial na Educação

..... 99
Rafaella Bortolosso Mendes

Exploiting Vulnerabilities by Creating an Attack Tree (AT) for a Denial of Service (DoS) Attack

..... 101
Caua M. Borowczak, Enzo M. D'andrea, Anderson A. A. Silva, Adilson E. Guelf

Proposta de Arquitetura para um Registrador Eletrônico de Ponto com Integração Móvel

..... 107
Camila Schmitt Soares, Jorge Luis Boeira Bavaresco

Sessão Técnica 6 – Controle e Automação II

Estudo Sobre Técnicas de Programação para Robô na Categoria Sumo LEGO® Utilizando o Controlador EV3 Intelligent Brick

..... 111
Luiz Fernando D. R. dos Santos, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Camila A. Alves, Eugenio M. J. da Silva, Maria Fernanda Paula Castro, Wanderson E. Saldanha

Estudo para Desenvolvimento de um Robô para a Categoria Sumô 3kg

..... 115
Luiz Fernando D. R. dos Santos, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Eugenio M. J. da Silva, Matheus M. F. Gazzola, Silas R. O. Junior, Wanderson E. Saldanha

Proposta de Implementação de Lidar para Robôs Autônomos Trekking

..... 119
Eugenio M. J. da Silva, Mayara do Prado Almeida, Tobias Bueno Pereira, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Wanderson E. Saldanha

Desenho e implementação de uma prótese de mão servo-atuada em impressora 3D FDM

..... 123
Marco Fabian Borda Wiegert, Dany Lileth Ferruffino Machado, Brian Arauco Paniagua

Sessão Técnica 7 – Elétrica, Ensino e Produção I

Start Engenharias: aperfeiçoamento do material didático sobre Arduino para aplicação nas escolas de ensino básico

..... 129
Andre do Nascimento, Mateus Almeida de Jesus, Pedro Eugênio Ramos

Estudo para o Desenvolvimento de um Aplicativo de Alfabetização Matemática

..... 133
Rayana Fernanda dos Santos Silva, E. L. J. Junior, G. F. Finazzi, L. G. Garcia, T. E. P. Oliveira, J. P. T. Dias, Wanderson E. Saldanha

INOVAÇÃO METODOLÓGICA: A Aprendizagem Baseada em Problemas dentro dos espaços de aprendizagem como inovação

..... 136
Leonardo Henrique de Almeida Pedro, Daianna Brasília Araújo Pompeu, Roger Antonio Rodrigues, Larissa Ferreira Dias Leite

Uma Plataforma de Gestão de Projetos de Moedas Sociais Digitais (MSD) indexadas, integradas a uma Blockchain Pública com protocolo de consenso LPoS

..... 141
Inocência Avelino Padilha, Katjusco de Farias Santos

Sessão Técnica 8 – Biomédica III

Desenvolvimento de aplicativo web para terapia de pacientes com lesão neurológica na fala e memorização

..... 153
Marcela de Cassia Ribeiro, Sabrina Ramos Silveira, Filipe Bueno Vilela, Rita Elizabeth Santos de Almeida, Elisa Rennó de Carneiro Dester

Desenvolvimento de tecnologia sem fio para monitoramento de temperatura em incubadoras neonatais

..... 159
Davi Padula Rabelo, Elisa Renno Carneiro Dester, Julia de F. Carvalho, Luma Rissatti

Borges do Prado, Pedro Paulo de P. Junqueira

Desenho e Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema de Vácuo por Venturi para uma Central de Gases Medicinais Hospitalares

..... 164
Brian Arauco Paniagua, Rodrigo Martinez Severich, Eynar Calle Viles, Maria Rene Ledezma Flores

Protótipo de Sistema de Monitoramento Remoto de Sinais Vitais com Arduino UNO e ESP32

..... 170
Mateo Sebastian Rojas Flores, Sara Edith Torrico Arancibia

Sessão Técnica 9 – Biomédica IV

Jogo sério para pré habilitação cirúrgica e reabilitação muscular em idosos

..... 174
Eduardo Pereira Valias, Elisa Rennó de Carneiro Dester, Rita Elizabeth Santos de Almeida

Estudo do Uso do Rastreamento Ocular para Transtorno do Espectro Autista e Neuro Educação

..... 179
Tiago Rodrigues Plum Ferreira, Caio Lima Ramos, Claudio Eduardo Lemes, Filipe Bueno Vilela, Luma Rissatti Borges do Prado, Elisa Renno Carneiro Dester

Aplicação da Fusão de Sensores Inerciais para Detecção de Ângulo de Rotação em uma Manopla de Detecção de Câncer de Mama

..... 184
Rodrigo Fernandes Patta, Alexandre de Jesus Aragão, Rodrigo Rech, Arthur Maximiano

Localizador Apical Inteligente: Design Voltado para a Praticidade e Eficiência em Tratamentos Endodônticos

..... 190
Facundo Calderon Cavero

Sessão Técnica 10 – Computação e Software II

Ambiente Personalizado para Aplicação de Técnicas de Aprendizado por Reforço na Categoria IEEE VSSS

..... 194
Davi Rosim, Felipe A. P. de Figueiredo

OFDM Signal Optimization with Genetic Algorithms for PAPR Reduction

..... 198
Matheus Rangel de Lima, Daniely Gomes Silva, Luciano Leonel Mendes

Assistente Virtual para Ansiedade: AVA

..... 204
Rayana Fernanda dos Santos Silva, Thalline Roberto Biggi, Mariana Helena Cunha Bochi, Wanderson E. Saldanha

Criação de casos de teste a partir de critérios de aceitação

..... 207
Samuel Sousa Teles, Rosana Celine Pinheiro Damaceno, Laís Carvalho Coutinho, Igor Ramsés Temóteo dos Santos, Rubens Abraão da Silva Sousa, Alex Lacerda Ramos

DactiloView: Um Sistema Interativo para o Aprendizado da Língua de Sinais Boliviana por meio de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs)

..... 213
Katherine Andrea Martinez Trillo

Sessão Técnica 11 – Controle e Automação III

Estudo do Sistema de Controle PID para Robos aplicados no IEEE Very Small Size Soccer (VSSS)

..... 218
Eugenio M. J. da Silva, Alexandre Baratella Lugli, Davi Rosim, Edmundo H. de P. Silva, Egidio Raimundo Neto, Enzo R. R. Lemos, Guilherme Moreira Virgulino, Joao Henrique S. Delfino, Kaynan Henrique D. de Melo, Marco A. Carnevali Ribeiro, Wanderson E. Saldanha

Desenvolvimento de um Robô para Competição na Categoria de Sumô 3kg

..... 223

Luiz Fernando D. R. dos Santos, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Eugenio M. J. da Silva, Samile Costa Barbosa, Samuel Silva Oliveira, Wanderson E. Saldanha

Desenvolvimento de Sistemas de Navegação e Controle para Robôs Autônomos Trekking

..... 229

Eugenio M. J. da Silva, Ewel Fernandes Pereira, Mayara do Prado Almeida, Tobias Bueno Pereira, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Wanderson E. Saldanha

Estudo e aplicação de tecnologias para Drones Autônomos Indoor

..... 232

Eugenio M. J. da Silva, Guilherme Moreira Virgulino, Sara E. de Souza, Samuel Silva Oliveira, Wanderson E. Saldanha, Alexandre Baratella Lugli, Egidio Raimundo Neto, Luiz Fernando D. R. dos Santos

Avaliação de Técnicas de Calibração para um Software de Eye Tracking

Rita Elizabeth Santos de Almeida, Isadora Coelho Faggiani, Leonardo Ribeiro Silva, Ana Clara Santos, Marcelo Vinícius Cysneiros Aragão & Juliano Augusto Nascimento Leite

Abstract— This article explores the critical aspect of Eye Tracking software calibration for accurate focal point detection and discusses techniques to enhance the process. A literature review was conducted initially to understand challenges and outlier removal methods. The article presents methods, including K-means for calibration and IQR, ECOD, or LOF for outlier removal. Qualitative and quantitative studies assessed these techniques, gathering participants' opinions and using metrics like Silhouette Score and Calinski-Harabasz. The article provides insights into improving data treatment for the Eye Tracking software calibration challenge.

Index Terms— Eye Tracking, Calibration, Clustering, Outlier Removal

Resumo— Este artigo aborda a calibração do software Eye Tracking, crucial para a precisão na detecção do ponto focal do usuário, e explora técnicas para aprimorar esse procedimento. Inicialmente, uma revisão bibliográfica foi realizada para abordar desafios no rastreamento ocular e técnicas de remoção de outliers. O trabalho discute métodos de melhoria da calibração, incluindo o uso do algoritmo K-means e a remoção de outliers por meio do IQR, ECOD ou LOF. Estudos qualitativos e quantitativos foram conduzidos para avaliar essas técnicas, coletando opiniões dos participantes e utilizando métricas como Silhouette Score e Calinski-Harabasz. O artigo proporciona uma visão ampla sobre o tratamento de dados e a abordagem de técnicas relacionadas ao desafio da calibração no software Eye Tracking.

Palavras Chave— Rastreamento Ocular, Calibração, Agrupamento, Remoção de Outliers

I. INTRODUÇÃO

Sabe-se que o mundo é repleto de informações visuais e, a maneira como nossos olhos se movem e processam essas informações, desempenha um papel fundamental na compreensão do ambiente que nos cerca. Tecnologias são criadas para acompanhar este progresso, como a de rastreamento ocular (do inglês, *Eye Tracking*), que é um dispositivo ou sistema de *software* capaz de promover o rastreamento e a gravação do comportamento ocular de um indivíduo em um determinado ambiente, identificando para onde ele dirige o seu olhar e registrando informações como a duração de tempo da atividade visual, a dilatação da pupila e a trajetória da movimentação do olhar [1].

Em geral, a movimentação ocular pode ser resumida na combinação de quatro movimentos básicos: sacadas, fixações, perseguições suaves e nistagmo. Duchowski [2] define cada técnica de visualização como:

- Sacadas: são movimentos voluntários e reflexivos, considerados desejos voluntários de mudar o foco da atenção;
- Fixações: as fixações são caracterizadas pelos movimentos oculares em miniatura, como tremor, deriva e microsacadas. São ditas como comportamentos nos quais sozinho permanecem estacionários em algum aspecto do ambiente;
- Perseguições suaves: dependem da amplitude do movimento do alvo e podem ocorrer em qualquer meridiano. São dados como movimentos lentos e contínuos;
- Nistagmo: é a combinação de diversos movimentos pequenos. É um mecanismo acoplado dos olhos, com a função de estabilizar os olhos e garantir uma visão nítida.

Dada a importância do estudo do movimento ocular interligado à preferência pessoal, o *Eye Tracking* revolucionou inúmeras áreas da ciência, tecnologia e *design*, fornecendo uma visão sem precedentes do comportamento humano e da interação com o mundo visual. Essa tecnologia, que permite rastrear os movimentos oculares de forma precisa e não intrusiva, desempenha um papel crítico na compreensão das preferências, interesses e tomadas de decisões dos indivíduos quando interagem com *smartphones* e computadores. É importante observar que o *Eye Tracking* cumpre um importante papel como método de pesquisa, uma vez que fornece diversas métricas para análises e interpretações, mas deve ser acompanhado por uma teoria que explique os fenômenos observados durante as visualizações [3].

No entanto, o desenvolvimento de sistemas de rastreamento ocular, embora promissor, também traz desafios significativos, como o escalonamento de dados, a escolha do método de captura, o uso de vídeos específicos para cada interesse, dentre outros. Assim, nota-se que a calibração emerge como uma das etapas mais cruciais e desafiadoras.

A calibração é o processo pelo qual o sistema de rastreamento ocular encontra uma função que mapeia as coordenadas relatadas pelo rastreador ocular para as coordenadas de um ponto de olhar no ambiente visual [4]. Desse modo, a qualidade dos dados refere-se à confiabilidade, validade e disponibilidade destes, podendo ser expresso com a consistência nas medições (precisão), proximidade com o valor verdadeiro (exatidão) e perda de informações. Isso implica a necessidade de estabelecer uma correspondência precisa entre a direção do olhar do usuário e os pontos de referência na tela ou no ambiente. Em outras palavras, a calibração é a chave para garantir que o rastreamento ocular funcione com a maior precisão possível, capturando com exatidão os movimentos oculares do usuário [5].

Desse modo, o presente trabalho concentra na parte da

calibração um dos principais desafios no desenvolvimento de sistemas de rastreamento ocular. A precisão e a exatidão da calibração é essencial para garantir que os dados coletados sejam confiáveis, permitindo que os pesquisadores, *designers* e profissionais de diversas áreas tomem decisões informadas e baseadas em evidências.

Técnicas e tecnologias inovadoras são desenvolvidas e incorporadas no *software* para enfrentar o desafio da calibração e aprimorar, ainda mais, este campo. Assim, é evidente como a calibração é uma parte mais crítica no aperfeiçoamento desta tecnologia, prometendo *insights* cada vez mais profundos sobre a relação entre o olhar humano e o mundo visual que nos rodeia.

Objetiva-se analisar diferentes técnicas de calibração para um *Software* de *Eye Tracking*. A fim de encontrar resultados exatos e precisos, serão abordados diferentes métodos para remoção de *outliers* e métricas de avaliação qualitativas e quantitativas do conjunto de dados referente ao rastreamento ocular.

II. REVISÃO DA TEORIA

A. *Eye Tracking*

É uma técnica utilizada para registrar o movimento dos olhos e a direção do olhar ao longo do tempo. Em 1823, Charles Bell estabeleceu uma conexão fisiológica entre os olhos e o sistema nervoso, abrindo caminho para a investigação dos processos mentais. Antes com um alto custo e trabalhoso, após anos de pesquisas e avanços tecnológicos, o *Eye Tracking* se tornou mais acessível. Atualmente é aplicado em diversas áreas como psicologia, medicina, neurociência, *marketing* e outras [6].

Há diversos métodos de rastreamento ocular, incluindo abordagens baseadas em forma, características e aparência, que procuram identificar tanto movimentos rápidos dos olhos quanto períodos de fixação. Além disso, o *Eye Tracking* é aplicado em quatro técnicas principais, sendo elas:

- Bobina de busca escleral: utiliza uma lente de contato com espelhos acoplados a uma bobina de fio que se move em um campo magnético, possibilitando a detecção precisa do movimento ocular;
- Oculografia por infravermelho (IOG): mede a luz infravermelha refletida da esclera para determinar a posição do olhar, sendo menos invasiva do que a técnica da bobina;
- Eletrooculografia (EOG): utiliza sensores para medir o campo elétrico gerado pelos movimentos oculares;
- Oculografia por vídeo (VOG): registra os movimentos dos olhos por meio de uma câmera, sendo uma técnica não invasiva amplamente utilizada.

Cada técnica possui vantagens e limitações, tornando-as adequadas para diferentes aplicações e cenários [7]. Dentre as limitações, cada técnica possui uma forma diferente de captura dos dados, o que está diretamente ligado a qualidade da resposta que o *software* entregará. Assim, sabendo que erros de coleta acontecem por diversos fatores, como condições ambientais, processamento operacional ou distrações do usuário, nota-se a necessidade de tratar os dados indesejados. Desse modo, a importância da escolha da técnica adequada e a eficiência da remoção de *outliers* é fundamental para um resultado satisfatório.

B. Remoção de *Outliers*

No contexto da análise de dados, um ponto muito importante e fundamental para a fomentação da pesquisa é garantir a qualidade dos dados. Desse modo, a busca pela compreensão de um conjunto de informações muitas vezes é dificultada por valores atípicos que parecem escapar das tendências e padrões identificados. Esses valores indesejáveis podem ser chamados de *outliers* e podem ser definidos como dados que se diferenciam drasticamente de todos os outros. Em outras palavras, um *outlier* é um valor que foge da normalidade e que pode causar anomalias nos resultados obtidos por meio de algoritmos e sistemas de análise [8].

A presença de valores discrepantes é uma ocorrência frequente em várias disciplinas e demanda atenção especial durante a análise, uma vez que pode influenciar as conclusões e comprometer a qualidade das inferências estatísticas. Além disso, esses pontos discrepantes podem servir para identificar sutilezas antes ocultas nos dados, proporcionando percepções valiosas sobre os processos e os sistemas que o geraram. Assim, é extremamente importante verificar se os pontos atípicos aconteceram devido à variabilidade nos dados ou devido a um erro experimental/erro humano.

No entanto, mesmo sendo um empecilho geralmente, alguns *outliers* são benéficos e extremamente importantes para indicarem que os dados são altamente diferentes de outros. Nesse contexto, podem apontar uma anomalia, como fraude bancária ou uma doença rara, sendo considerados uma das maneiras mais simples de solucionar, ou inspecionar um caso específico [9].

Devido às situações que são necessárias que haja a retirada dos dados fora da normalidade, algumas técnicas foram criadas para serem incorporadas na análise de dados e assim fazer com que o estudo seja coerente. Desse modo, existem várias abordagens e ferramentas disponíveis para tratar *outliers* e a escolha da melhor estratégia depende do contexto específico do problema e da natureza dos dados.

b.1. *IQR*

O *Inter Quartile Range* (*IQR*) é uma ferramenta estatística que analisa e identifica valores irregulares em conjuntos de dados. O *IQR* é empregado para avaliar a variabilidade ao dividir um conjunto de dados em quartis. Esses dividem um conjunto ordenado de dados em quatro partes iguais. Como visto na equação (1), seu cálculo é bastante simples:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (1)$$

Sendo:

- $Q1$ é o primeiro quartil (25º percentil);
- $Q3$ é o terceiro quartil (75º percentil).

Esse cálculo proporciona uma medida da dispersão dos dados que não é sensível a *outliers*, tornando-o robusto em comparação com outras estatísticas. A natureza do *IQR* o torna particularmente útil na detecção de valores extremos que poderiam distorcer análises estatísticas.

Primeiramente, calcula-se o *IQR* conforme a equação mencionada. Em seguida, multiplica-se o *IQR* por 1,5. Os limites superior (L_S) e inferior (L_I) são obtidos adicionando e subtraindo

esse valor de $Q3$ e $Q1$, respectivamente. Assim, qualquer ponto de dados que esteja acima do limite superior (2), ou abaixo do limite inferior (3), é classificado como um valor atípico.

$$L_S = Q3 + 1,5 \times IQR \quad (2)$$

$$L_I = Q1 - 1,5 \times IQR \quad (3)$$

Sendo:

- L_S é o limite superior;
- L_I é o limite inferior;
- $Q1$ é o primeiro quartil (25º percentil);
- $Q3$ é o terceiro quartil (75º percentil);
- IQR é o intervalo interquartil.

A remoção de *outliers* com base no IQR proporciona uma abordagem equilibrada, eliminando valores discrepantes que podem distorcer análises estatísticas sem comprometer a integridade do conjunto de dados na totalidade. No entanto, é preciso ter cautela ao remover valores discrepantes, pois, em alguns casos, podem conter informações importantes ou representar situações relevantes para o fenômeno estudado [9]. O presente estudo visa remover valores atípicos encontrados após o processo de calibração, conforme detalhado na seção IV.

b.2. ECOD

Empirical-Cumulative-distribution-based Outlier Detection (ECOD) é uma técnica sofisticada empregada para identificar e tratar dispersões em conjuntos de dados espaciais. Sua abordagem é fundamentada na ideia de que os *outliers* geralmente se apresentam como eventos raros localizados nas extremidades de uma distribuição. Para operar, o ECOD começa estimando a distribuição dos dados de entrada de forma não paramétrica. Isso é feito por meio do cálculo da distribuição empírica cumulativa por dimensão dos dados, ajudando a compreender melhor a estrutura dos dados e a identificar padrões incomuns.

Em seguida, com base nessas distribuições empíricas, o ECOD estima as probabilidades de ocorrência nas extremidades para cada ponto de dados. Por fim, o ECOD calcula uma pontuação atípica de cada ponto de dados agregando probabilidades de cauda estimadas entre dimensões [10]. Isso ajuda a destacar pontos de dados que se desviam significativamente do comportamento esperado, permitindo uma identificação mais precisa dos *outliers*.

Uma das principais vantagens do ECOD é sua capacidade de ser facilmente interpretado. Além disso, o fato de ser isento de parâmetros torna-o uma opção descomplicada, enquanto ainda mantém altos níveis de precisão, eficiência e escalabilidade, tornando-o uma escolha atraente para análise de dados.

b.3. LOF

O *Local Outlier Factor* (LOF) é uma técnica amplamente reconhecida e utilizada para identificar valores discrepantes em dados. É baseado na ideia de densidade local, onde a densidade em torno de uma amostra é comparada com a densidade ao redor de seus vizinhos. O fator de *outlier* local de uma amostra é calculado como a média das razões da densidade local da amostra e das densidades locais de seus vizinhos. Um valor de LOF significativamente maior do que um, indica um valor disperso.

O LOF pode ser aplicado em diferentes áreas, como detecção de fraude, monitoramento de redes e análise de dados ambientais. Sua capacidade de lidar com diferentes tipos de dados e de se adaptar a diferentes distribuições de dados o tornam uma ferramenta valiosa em múltiplos domínios do conhecimento [11].

Apesar de sua utilidade, o LOF tem limitações. A escolha dos parâmetros, como o número de vizinhos, pode afetar significativamente os resultados. Dessa forma, melhorias como a introdução de parâmetros adaptativos ou a combinação com outras técnicas de aprendizado de máquina para aumentar a precisão na detecção de *outliers* podem ser necessárias [12].

C. Clustering

Clustering é uma técnica amplamente empregada na análise e mineração de dados, visando agrupar objetos semelhantes em *clusters* ou grupos com base em características compartilhadas. Além disso, nesta revisão teórica, será discutido não apenas o algoritmo *K-means*, mas também, duas métricas cruciais para avaliar a qualidade dos conjuntos produzidos: o índice Calinski-Harabasz e o *Silhouette Score*.

O algoritmo *K-means* é um dos métodos mais populares de *clustering* e se baseia na ideia de pontos centrais. Ele começa selecionando os pontos iniciais como centros e, em seguida, atribui cada ponto de dados ao grupo em que o centro está mais próximo. Em seguida, recalcula os centros como a média dos pontos atribuídos a cada *cluster* e repete esse processo até a convergência. O *K-means* é uma abordagem eficaz e de fácil implementação, mas sua eficácia pode ser prejudicada caso o algoritmo faça escolhas iniciais ruins para os centros.

Para avaliar a qualidade dos conjuntos de dados gerados pelo *K-means*, duas métricas amplamente utilizadas são o índice Calinski-Harabasz e o *Silhouette Score*.

O índice Calinski-Harabasz, também conhecido como critério de validação da variância, avalia a dispersão entre os agrupamentos e a dispersão dentro deles. Ele visa maximizar a relação entre essas duas dispersões, sugerindo uma separação eficaz entre os valores associados. Um valor mais alto no índice Calinski-Harabasz indica uma separação mais eficiente dos *clusters*.

O *Silhouette Score*, em contrapartida, avalia a coesão nos *clusters* e a separação entre eles. Ele fornece um valor entre -1 e 1 , onde valores próximos de 1 indicam que os objetos estão bem separados entre os conjuntos, valores próximos de 0 indicam sobreposição entre os *clusters* e valores negativos indicam que os objetos foram atribuídos erroneamente aos conglomerados. Portanto, quanto maior o *Silhouette Score*, melhor a qualidade do agrupamento.

c.1. Algoritmo K-means

O algoritmo *K-means* padrão, originalmente proposto em 1957 por Stuart Lloyd, foi publicado somente nos laboratórios Bell, que historicamente foram centros de inovações cruciais no campo tecnológico, tais como a invenção dos transistores, a fibra óptica, satélites de comunicação e a linguagem de programação C. Posteriormente, em 1965, uma versão do mesmo método foi publicada por E. W. Forgy, conferindo a este algoritmo a designação de Lloyd-Forgy. Uma versão ainda mais aprimorada do algoritmo foi apresentada em 1979 por Hartigan

e Wong, sendo desenvolvida em linguagem Fortran, demonstrando uma eficiência consideravelmente superior. [13], [14].

O algoritmo *K-means* é um método de aprendizado de máquina não supervisionado, o seja, não requer que as amostras sejam rotuladas. Esse algoritmo é empregado para agrupar dados com base em suas semelhanças [15]. A aplicação do *K-means* é amplamente difundida na mineração de dados, e seu principal objetivo é realizar a *clusterização* [16].

Para a utilização do algoritmo é imprescindível ser possível calcular a média entre os conjuntos de dados e a distância euclidiana entre esses pontos. Assim sendo, é comum que os dados de entrada sejam representados no formato de vetores numéricos [16].

A aplicação do *K-means* começa pela definição do número de grupos desejados, denominados *clusters*. Em seguida, um centroide é aleatoriamente atribuído a cada conjunto, e através do cálculo da distância euclidiana, determina-se a qual desses conjuntos cada ponto de dado pertence. Depois que todos os pontos foram atribuídos aos seus respectivos grupos, é calculada a média dos pontos em cada conjunto individualmente. Os centroides são então reposicionados de acordo com essas médias, e os pontos são novamente alocados com base no centroide mais próximo. Esse processo se repete até que os pontos estejam devidamente distribuídos nos *clusters* apropriados [17].

c.2. Silhouette Score (SS)

O *Silhouette Score* é uma métrica amplamente empregada na avaliação de algoritmos de *clustering*, desempenhando um papel fundamental na validação dos resultados obtidos durante o processo de agrupamento de dados, comumente empregado em estudos acadêmicos e projetos de análise de dados [18].

A análise busca por meio de uma faixa de valores, -1 e $+1$, quantificar o quão bem agrupado estão os dados, de modo que -1 indique que os pontos foram agrupados erroneamente, e $+1$ evidencie um agrupamento perfeito [19]. Já o retorno do índice de valor 0 aponta a sobreposição de *clusters*, um resultado indesejado para a análise de dados. Essa avaliação considera o quão próximo um ponto de um determinado conjunto de dados está de outro ponto situado em seu vizinho.

O *Silhouette Score* é calculado utilizando a distância média intra *cluster* e a distância média entre um *cluster* e o seu vizinho [19]. O cálculo da métrica é dado conforme a equação (4):

$$S = \frac{b - a}{\max(a, b)} \quad (4)$$

Sendo:

- a é a distância média intra-cluster;
- b é a distância média do *cluster* mais próximo.

Assim, pode-se dizer que o *Silhouette Score* é uma métrica sobre o nível de coesão de um agrupamento e o de separação entre eles, sendo de grande importância para grandes conjuntos de dados os quais a visualização dos *clusters* é inviável [20].

c.3. Índice de Calinski-Harabasz (CH)

A métrica Calinski-Harabasz ou também nomeada de Critério de Razão de Variância, é frequentemente empregada na avaliação de técnicas de agrupamento [21].

Para se calcular o índice de Calinski-Harabasz deve-se realizar os seguintes passos [22]:

- *Overall within-cluster variance* (SS_w)

Realizar o cálculo da *overall within-cluster variance* (SS_w), no português “variação geral no *cluster*”, que consiste na soma dos quadrados da distância de cada ponto em relação ao baricentro de seu respectivo *cluster*, por meio da equação (5):

$$SS_w = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - m_i\|^2 \quad (5)$$

Sendo:

- C_i é o *cluster* do i -ésimo *cluster*;
- X é um ponto pertencente ao *cluster* C_i ;
- m_i é o baricentro do *cluster* C_i .

- *Overall between-cluster-variance* (SS_b)

Realizar o cálculo da *overall between-cluster variance* (SS_b), no português “variação geral entre *clusters*”, calculada a partir da diferença entre a soma dos quadrados da distância de cada ponto para o baricentro do conjunto de dados e o *overall within-cluster variance* (SS_w), por meio da equação (6):

$$SS_b = \left(\sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - C\|^2 \right) - SS_w \quad (6)$$

Sendo:

- C_i é o i -ésimo *cluster*;
- X é um ponto pertencente ao *cluster* C_i ;
- C é o baricentro do conjunto de dados.

E por fim, utiliza-se os valores encontrados anteriormente de SS_w e SS_b para calcular o índice de Calinski-Harabasz, como pode ser visto na equação (7):

$$CH = \frac{SS_b}{SS_w} \times \frac{N - K}{K - 1} \quad (7)$$

Sendo:

- CH é o Índice de Calinski-Harabasz;
- N é a quantidade de pontos;
- K é a quantidade de *clusters*.

Caso a variação geral entre *clusters* seja maior que variação geral dentro de cada um deles, o índice será elevado, indicando resultado satisfatório na tarefa de *clusterização*. Pois quanto maior o índice, mais densos e separados estão os agrupamentos dos dados [22].

O uso do Calinski-Harabasz permite identificar a coesão dos conjuntos formados sem requerer alto nível de processamento, pois o seu tempo de execução é linear em relação ao número de pontos de dados, ou seja, possui uma complexidade $O(N)$. Contudo, a ferramenta apresenta um bom desempenho frente a outras métricas de validação de agrupamento [23].

III. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

O objetivo desta revisão bibliográfica é avaliar e comparar o desempenho de diferentes métodos de remoção de *outliers*

e agrupamento de dados, principalmente para o *software Eye Tracking*.

Para realizar a busca foram utilizadas as seguintes palavras-chave: *Eye Tracking*, IQR, ECOD, LOF e *K-means*. Ao invés de empregar uma estratégia de pesquisa que combinasse as palavras-chave simultaneamente, optou-se por explorar cada termo isoladamente. Desse modo, foram selecionados seis artigos referentes aos temas abordados nesta seção.

A. *A practical guide on conducting Eye Tracking studies in software engineering* (2020)

Sharafi et al. [24] apresentam um estudo abrangente sobre a utilização de rastreamento ocular principalmente em engenharia de *software*. O objetivo principal é fornecer orientações práticas para pesquisadores interessados em projetar, executar e relatar estudos de rastreamento ocular nessa área. A metodologia proposta abrange desde a configuração e calibração dos equipamentos de rastreamento ocular até a análise e interpretação dos dados coletados. Um destaque importante é dado à calibração, sendo um processo crucial para garantir a precisão e confiabilidade dos dados de rastreamento ocular. Os resultados obtidos nesse estudo incluem exemplos de estudos anteriores que utilizaram rastreadores oculares em engenharia de *software*, bem como uma lista de métricas, visualizações e análises estatísticas comumente utilizadas para analisar e relatar os dados de rastreamento ocular. Fornece uma base sólida de como utilizar o rastreamento ocular, destacando a importância da calibração adequada e fornecendo orientações práticas para o planejamento e execução.

B. *Evaluation of appearance-based Eye Tracking calibration data selection* (2020)

Li, Zhan e Yang [25] oferecem uma análise aprofundada da avaliação de dados de calibração para o rastreamento ocular. O objetivo do estudo é analisar o impacto da seleção de dados e da distribuição de alvos de calibração na precisão do *software* para cada indivíduo. A metodologia proposta no estudo envolve o treinamento de uma rede neural convolucional (CNN) e o uso de regressão via vetores de suporte (SVR) para a calibração. Os resultados destacam que o aumento no número de alvos de calibração resulta em uma redução no erro de estimativa do olhar. No entanto, a forma da distribuição dos alvos de calibração também desempenha um papel crucial, com a distribuição em forma de retângulo apresentando um desempenho superior em termos de precisão. O artigo ressalta a importância de uma seleção adequada dos dados de calibração e sugere que a distribuição dos alvos de calibração deve ser cuidadosamente considerada ao escolher um número limitado de dados para a calibração. Além disso, o estudo discute o uso de capturas sob condições de iluminação semelhantes.

C. *How to Find Outliers — 4 Ways with Examples and Explanation* (2023)

Bhandari [26] discute quatro métodos para identificar *outliers* em um conjunto de dados: o método de classificação, o método de visualização de dados, os testes estatísticos (z scores) e o método do intervalo interquartil (IQR). O objetivo do artigo é ajudar os leitores a identificar e lidar com *outliers* em

seus conjuntos de dados. O artigo também discute a calibração do *software* de *Eye Tracking* e como os *outliers* podem afetar a precisão dos resultados. O artigo menciona que os *outliers* podem ser agrupados em *clusters*, correspondendo aos períodos em que o sujeito não estava olhando para o alvo de calibração. O artigo também menciona que a calibração do *Eye Tracking* pode ser difícil com sujeitos que não cooperam, como primatas e bebês. O artigo conclui que é importante identificar cuidadosamente os *outliers* em um conjunto de dados e lidar com eles de maneira adequada para obter resultados precisos.

D. *ECOD: Unsupervised Outlier Detection Using Empirical Cumulative Distribution Functions* (2022)

Li et al. [10] apresenta o ECOD como alternativa as limitações dos métodos existentes, como alto custo computacional, ajuste de hiperparâmetros complexo e limitada interpretabilidade. A metodologia proposta pelo ECOD consiste em estimar a distribuição subjacente dos dados de entrada de forma não paramétrica, calcular as probabilidades de cauda por dimensão para cada ponto de dados e, em seguida, computar um *score* de *outlier* agregando as probabilidades de cauda estimadas. Os resultados mostram que o ECOD supera 11 métodos de referência em termos de precisão, eficiência e escalabilidade em 30 conjuntos de dados de referência. Além disso, o artigo destaca que o ECOD é fácil de interpretar, fornecendo informações sobre como cada dimensão contribui para o *score* de *outlier*. O *software* ECOD foi calibrado por meio de extensos experimentos em 30 conjuntos de dados de referência, sendo disponibilizado como uma implementação em *Python* de fácil uso e escalabilidade.

E. *Model-Based Outlier Detection System with Statistical Preprocessing* (2016)

Singh e Leavline [27] propõem um sistema de detecção de *outliers* baseado em modelos com pré-processamento estatístico. O objetivo é detectar partes errôneas ou objetos anormais em populações definidas. A metodologia proposta emprega o uso do Intervalo Interquartil (IQR) para pré-processar os dados de treinamento, junto com a aplicação do algoritmo de *clustering K-means* para construir o modelo de detecção de *outliers*. O desempenho do sistema é avaliado por meio de métricas, como o erro quadrático médio e o tempo necessário para construir o modelo. O algoritmo IQR foi aplicado para identificar e remover os *outliers* dos conjuntos de dados, enquanto o algoritmo *K-means* foi empregado para a construção do modelo de detecção de *outliers*. Os resultados destacam que o sistema proposto reduz consideravelmente o erro quadrático médio e o tempo necessário para construir o modelo em comparação com a detecção de *outliers* sem o pré-processamento estatístico.

F. *A Review of Local Outlier Factor Algorithms for Outlier Detection in Big Data Streams* (2020)

Alghushairy et al. [11] fazem uma revisão bibliográfica que analisa a literatura existente sobre algoritmos de detecção de *outliers* locais em ambientes de fluxo de dados, com foco especial no algoritmo LOF. Os resultados destacam a eficácia e precisão desse *software* na detecção de *outliers*, ressaltando a

importância da calibração para garantir sua efetividade. Além disso, destaca-se a importância da detecção de *clusters* e como esse aspecto pode contribuir significativamente para identificar *outliers*. O artigo aborda também a calibração de um *software* usando o algoritmo LOF, enfatizando a necessidade de selecionar criteriosamente os parâmetros para assegurar a eficácia do algoritmo. Métodos de calibração do LOF, como a validação cruzada e a otimização de parâmetros são discutidos e o artigo destaca a importância de considerar o contexto específico de cada aplicação ao escolher os parâmetros para esse *software*. Os trabalhos revisados nesta seção apresentaram diversas abordagens, modelos e técnicas que podem ser usadas para a melhoria da calibração do *Software Eye Tracking*. Dessa forma, as informações extraídas dos artigos serão utilizadas na seção de “experimentos”, uma vez que o intuito deste trabalho é avaliar as melhores técnicas de calibração e remoção de *outliers*.

IV. PROPOSTA

Neste trabalho são abordadas diferentes técnicas para análise de calibração de *software* de rastreamento ocular, tendo como objetivo otimizar a precisão dos resultados obtidos com o *software Eye Tracking*. O fluxo de funcionamento do trabalho proposto está descrito na forma de um fluxograma (Figura 1).

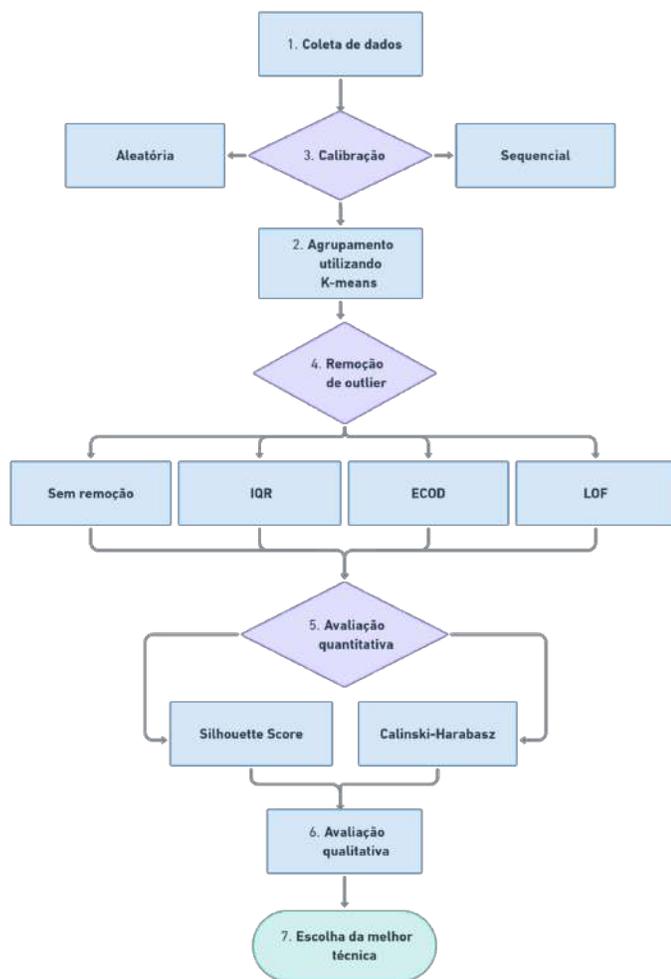


Fig. 1. Fluxograma que descreve o funcionamento do trabalho.

Inicialmente são realizadas as coletas dos dados provenientes

do rastreamento ocular de indivíduos voluntários para a pesquisa, desse modo os voluntários realizam a calibração do *software* das seguintes formas:

- Calibração Sequencial: na calibração sequencial, os pontos de calibração aparecem em sequência na tela do computador, de forma que o primeiro ponto seja plotado próximo à coordenada (0,0) da tela, o ponto seguinte é plotado em sua sequência no sentido da esquerda para a direita e dessa forma o último ponto de calibração será plotado próximo ao canto inferior direito, a coordenada pode variar conforme a resolução do computador utilizado no processo. Desta forma é possível que o voluntário preveja a localização do ponto seguinte a ser mostrado na tela;
- Calibração Aleatória: dessemelhante ao método anterior, a plotagem dos pontos de calibração ocorre de forma aleatória ao decorrer do processo, não seguindo o padrão de sequência. Nesse método o voluntário não sabe qual será a localização do próximo ponto a ser apresentado na tela.

Após a calibração, é realizado o agrupamento dos dados provenientes desta etapa, utilizando o algoritmo *K-means* para ser possível aplicar as técnicas de remoção de *outliers*. O estudo prevê a aplicação de três diferentes métodos para remoção de *outliers* nos pontos captados na fase de calibração, já destacadas na seção III, sendo elas:

- Não remoção de *outliers*: essa abordagem se refere a não remoção dos valores discrepantes em relação ao restante do conjunto de dados, a fim de comparação com a utilização das demais técnicas que visam a remoção dos valores atípicos;
- IQR (Intervalo Interquartil): a técnica proposta diz respeito a utilização de análise estatística para remover possíveis valores considerados atípicos nos conjuntos de dados;
- ECOD (*Empirical-Cumulative-Distribution-Based Outlier Detection*): corresponde a uma técnica baseada no cálculo da distribuição empírica cumulativa dos dados que visa identificar e remover pontos que se dispersam significativamente do restante do conjunto;
- LOF (*Local Outlier Factor*): o fator de *outlier* local de uma amostra é calculado como a média das razões da densidade local em que aquele ponto está inserido e das densidades locais dos pontos ao redor. Um valor de LOF consideravelmente maior do que 1, indica que aquela amostra é um valor atípico.

Para a validação dos métodos utilizados, faz-se necessário a utilização de técnicas quantitativas e qualitativas de avaliação. Desse modo, foram selecionados os seguintes algoritmos para a validação quantitativa das técnicas descritas anteriormente:

- *Silhouette Score*: é empregado a métrica de avaliação de qualidade de agrupamento, em que é avaliada a distância entre os *cluster* e a proximidade dos pontos dentro desses agrupamentos realizados pelo *K-means*;
- Calinski-Harabasz: possui o mesmo objetivo do algoritmo citado acima. Visa avaliar quantitativamente a coerência entre os *clusters* formados com os dados obtidos na calibração por meio da dispersão média entre os *clusters* e a dispersão média dos pontos presentes nos *clusters*.

Para complementar a validação dos algoritmos empregados no estudo, é aplicado o método de avaliação qualitativa. Desse modo são coletados votos dos voluntários para os métodos que julgarem mais eficientes e que considerem com o melhor resultado, considerando usabilidade e precisão do rastreamento ocular visualizado no gráfico de calor plotado ao final do teste.

V. EXPERIMENTOS

Nesta seção, é descrita detalhadamente a metodologia aplicada na realização dos experimentos e são apresentados e discutidos os resultados por meio das métricas quantitativas e qualitativas descritas na proposta.

A. Metodologia

A metodologia adotada nesse experimento visa explorar as funcionalidades das técnicas aplicadas para a calibração do *software Eye Tracking*. Os testes foram realizados com sete participantes que efetuaram a calibração oito vezes referente a todas as combinações possíveis entre os métodos de remoção de *outlier* (IQR, ECOD, LOF) e as formas de calibração (sequencial ou aleatória) e assistiram a um vídeo exemplo, permitindo que o sistema registrasse e analisasse os movimentos oculares. Essa abordagem promete não apenas avaliações quantitativas acerca da remoção de *outliers*, mas também uma compreensão qualitativa da qualidade do resultado da detecção.

a.1. Aspectos do Software

O *software* utilizado no estudo foi desenvolvido anteriormente pela equipe utilizando a linguagem *Python* e possui como principais funcionalidades: captura de dados, calibração, escalonamento e exibição dos dados. A exibição é apresentada em forma de gráficos de calor (*heatmap*), como pode ser visualizado na (Figura 2), de modo que as áreas de menor interação apresentam uma coloração mais fria e as áreas com maior visitação do olhar são representadas por cores quentes.

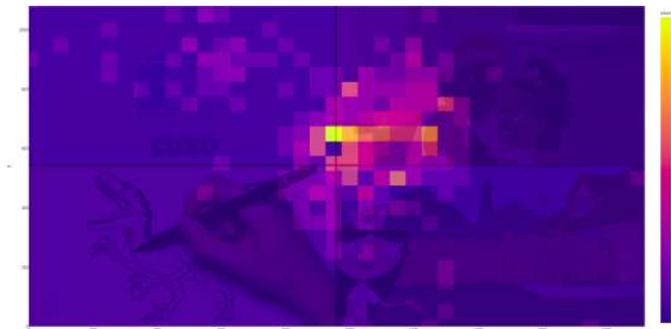


Fig. 2. Exemplo de um gráfico de calor exibido ao final da captura, após a exibição do vídeo de exemplo.

Para a realização do teste foi utilizado um *notebook* com resolução de tela de 1920×1080 . Na calibração, foram utilizadas 4 colunas por 3 linhas, com um total de 12 pontos, se considerar que a razão de aspecto da tela é de $16 : 9$ teríamos um total de 144 pontos de calibração, o que seria inviável considerando o tempo exigido para o processo. Para um resultado mais detalhado do gráfico de calor, foram definidos os parâmetros *nbinsX* com o valor de 64 e *nbinsY* com o valor 32, que dizem respeito ao *grid* do *heatmap*.

A duração total da calibração é de 1 minuto e 36 segundos, visto que cada ponto é exibido na tela por um período de 8 segundos. Já a taxa de amostragem realizada pelo algoritmo é de 0.01 segundos, ou seja, a cada 10 milissegundos uma coordenada é captada pela *webcam* utilizando a técnica de oculografia por vídeo (VOG). O valor da taxa de amostragem foi escolhido objetivando obter uma quantidade de dados suficientes sem causar sobrecarga no processamento dos dados, o que comprometer a execução do algoritmo durante a realização da captura. Naturalmente, esta taxa de captura é teórica, pois o tempo de processamento realizado para localização da pupila também deve ser considerado.

Em todos os testes, utilizou-se o método de *K-means* para efetuar o agrupamento de dados.

a.2. Condições Ambientais

Primeiramente, foi considerado a iluminação do ambiente em que foram realizados os testes, visto que esse parâmetro é essencial para a melhor captura de dados e precisão do algoritmo. É necessário que tenha-se um ambiente claro a fim de que o *software* consiga identificar facilmente a localização da pupila. A iluminação utilizada foi luz artificial branca e os participantes foram instruídos a se sentarem em um local estratégico de modo que não houvesse sombra em seus olhos. Todos os participantes se sentaram no mesmo local, garantindo que a luminosidade não variasse entre um teste e outro.

Concomitantemente, a ergonomia é um aspecto fundamental dessa avaliação, visando não apenas a precisão dos resultados, mas também o conforto dos participantes. O computador utilizado nos testes foi disposto a uma altura de 16 centímetros acima da mesa (Figura 3) e os participantes foram instruídos a manterem a cabeça estática, movimentando somente os olhos durante todo o experimento.



Fig. 3. Exemplo de posicionamento durante a realização do teste.

Os participantes foram posicionados centralizados em relação à câmera, de maneira que a mesma ficasse levemente abaixo do nariz (Figura 4).



Fig. 4. Exemplo de posicionamento durante a realização do teste.

a.3. Etapas realizadas

Além de todas essas condições favoráveis, deve-se atentar ao processo de realização dos testes e, desse modo, as etapas a seguir foram realizadas:

1. **Instrução:** em um primeiro momento, os participantes foram instruídos sobre o funcionamento do experimento a ser realizado. Logo em seguida, o indivíduo foi centralizado à frente da *webcam* para a captação dos movimentos oculares. Na etapa de calibração, o integrante olhou diretamente para os pontos dispostos na tela. Na etapa de teste, foi exibido um vídeo contendo quatro quadrantes para ser assistido pelo participante;
2. **Calibração:** o indivíduo manteve seu olhar fixo nos pontos correspondentes de calibração. Esses pontos podem ser sequenciais ou aleatórios, estando dispostos em uma tela preta que permitirá a total atenção nos pontos brancos, como na (Figura 5);

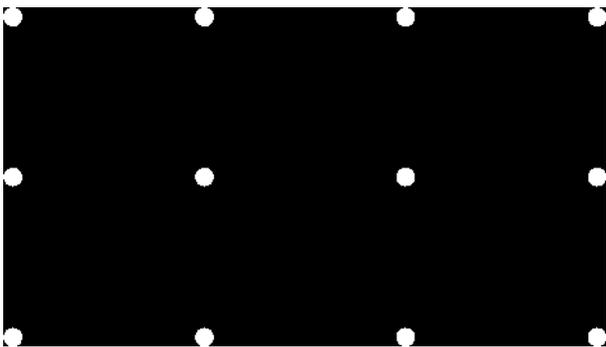


Fig. 5. Posicionamento dos pontos durante a calibração 4x3.

3. **Teste:** na etapa do teste, um vídeo, dividido em quatro quadrantes na tela com cada um contendo um vídeo diferente, foi exibido aos participantes (Figura 6). Isso permite que o indivíduo escolha para quais quadrantes sua atenção será dirigida e, ao final da captura, avalie, por meio do *heatmap*, se sua interação com o *software* está precisa, ou seja, se as regiões para as quais olhou foram destacadas no gráfico;

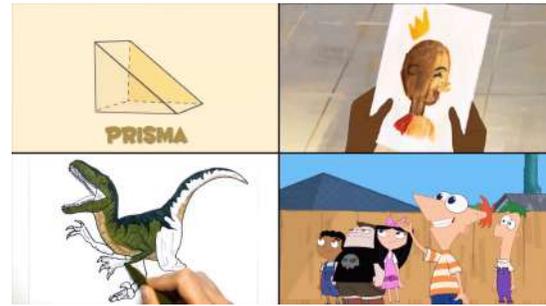


Fig. 6. Imagem do vídeo exibido durante o experimento.

4. **Avaliação qualitativa:** na avaliação qualitativa, o indivíduo visualizou o vídeo para todos os oito testes, sendo questionado a respeito de qual o melhor resultado de detecção, baseado no *heatmap* gerado e nas áreas em que ele fixou seu olhar;
5. **Avaliação quantitativa:** na avaliação quantitativa, onde as métricas de avaliação *Silhouette Score* e Calinski-Harabasz foram utilizadas, os índices retornados foram salvos para posteriormente serem analisados.

B. Resultados e Discussão

Após a realização dos testes, foram armazenados os valores dos índices de *Silhouette Score* e Calinski-Harabasz, e as imagens geradas durante o teste realizado por cada participante.

Dentre os dados armazenados, têm-se os gráficos de dispersão gerados após a calibração, sendo um para amostras sem a remoção de *outliers* (Figura 7) e um com a remoção de *outliers* (Figura 8) referente ao método utilizado no teste em questão, permitindo uma análise visual da qualidade da *clusterização*.

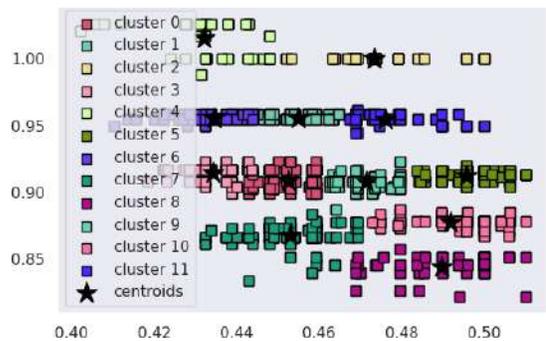


Fig. 7. Exemplo de gráfico de dispersão antes da remoção dos *outliers*.

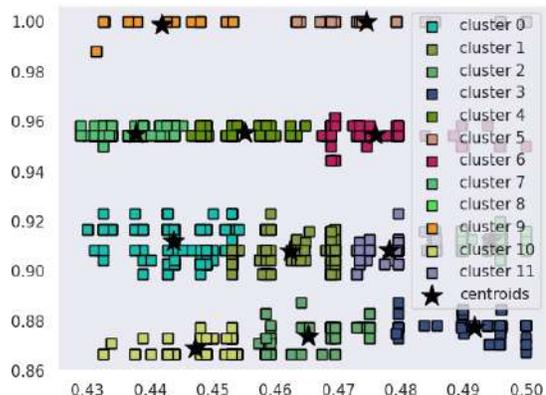


Fig. 8. Exemplo de gráfico de dispersão após a remoção dos *outliers* utilizando calibração sequencial e o método ECOD.

Além disso, durante a captura dos dados, foi questionado a cada participante para qual quadrante ele estava direcionando o seu olhar, e o *heatmap* resultante da captura foi armazenado (Figura 9), permitindo que no final do teste fosse realizada a comparação precisa entre a região observada e o gráfico de calor gerado. Diante disso, foi possível efetuar a avaliação qualitativa do *software* após a realização dos testes pelo participante.

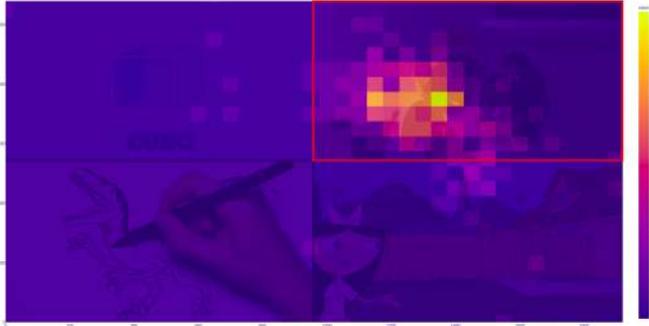


Fig. 9. Exemplo de *heatmap* com quadrante de interesse em destaque.

Os índices de Calinski-Harabasz e *Silhouette Score* foram salvos em arquivos de texto para serem utilizados como métricas de avaliação quantitativa.

A partir dos dados coletados foram realizados cálculos de média e desvio-padrão. O aumento na média de ambos os índices indica uma qualidade superior no agrupamento, assim como a redução no desvio-padrão para ambos os índices sugere um resultado mais consistente. Também foram registrados os votos referentes à avaliação qualitativa, resultando na tabela II.

TABELA I
RESULTADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO

K	O	CH_M	CH_{SD}	SS_M	SS_{SD}	V
S	-	3955,52	2608,97	0,49	0,03	1
S	IQR	3083,18	1170,07	0,47	0,05	1
S	ECOD	5466,12	3715,01	0,52	0,07	0
S	LOF	4797,10	2330,52	0,56	0,09	0
A	-	6024,97	2988,68	0,50	0,07	1
A	IQR	7047,92	3401,18	0,49	0,04	2
A	ECOD	7460,87	3786,84	0,54	0,06	1
A	LOF	7899,10	7899,12	0,50	0,10	1

Sendo:

- K : tipo de calibração: sequencial (S) ou aleatório (A);
- O : remoção de *outlier* (nenhum, IQR, ECOD ou LOF);
- CH_M : média do índice Calinski-Harabasz;
- CH_{SD} : desvio-padrão do índice Calinski-Harabasz;
- SS_M : média do *Silhouette Score*;
- SS_{SD} : desvio-padrão do *Silhouette Score*;
- V : quantidade de votos.

Para fins de comparação entre as duas diferentes métricas de avaliação quantitativas, foi realizado a normalização das médias e desvios-padrões de Calinski-Harabasz e *Silhouette Score*. Ao normalizar os dados, pode-se perceber que todos foram ajustados para uma faixa de valores entre 0 e 1. Para o

cálculo de normalização da média foi utilizada a equação 8:

$$M' = \frac{M}{\max(\vec{M})} \quad (8)$$

Sendo:

- M' é a média depois da normalização;
- M é a média antes da normalização;
- \vec{M} é o conjunto de médias;
- $\max(\vec{M})$ é o maior valor de média do conjunto.

A normalização do desvio-padrão foi feita conforme a equação 9:

$$SD' = \frac{\min(\vec{SD})}{SD} \quad (9)$$

Sendo:

- SD' é o desvio-padrão depois da normalização;
- SD é o desvio-padrão antes da normalização;
- \vec{SD} é o conjunto de o desvios-padrões;
- $\min(\vec{SD})$ é o menor valor de desvio-padrão do conjunto.

Os valores normalizados podem ser visualizados pela tabela III. Observa-se que o método LOF combinado com a calibração aleatória possui a maior média normalizada para o índice Calinski-Harabasz, atingindo o valor de 1, já o menor valor de desvio-padrão do índice diz respeito ao método IQR juntamente com a calibração sequencial também normalizado para 1.

Referindo-se ao método *Silhouette Score*, percebe-se que o maior valor de média também diz respeito ao método LOF, porém quando combinado com a calibração sequencial, já o menor desvio-padrão apresentado é evidenciado na captura em que nenhum método de remoção de *outlier* foi empregado.

TABELA II
RESULTADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO COM VALORES NORMALIZADOS

K	O	CH'_M	CH'_{SD}	SS'_M	SS'_{SD}	V
S	-	0,501	0,448	0,875	1,000	1
S	IQR	0,390	1,000	0,839	0,600	1
S	ECOD	0,692	0,315	0,929	0,429	0
S	LOF	0,607	0,502	1,000	0,333	0
A	-	0,763	0,392	0,893	0,429	1
A	IQR	0,892	0,344	0,875	0,750	2
A	ECOD	0,945	0,309	0,964	0,500	1
A	LOF	1,000	0,148	0,893	0,300	1

Sendo:

- K : tipo de calibração: sequencial (S) ou aleatório (A);
- O : remoção de *outlier* (nenhum, IQR, ECOD ou LOF);
- CH'_M : média normalizada do índice Calinski-Harabasz;
- CH'_{SD} : desvio-padrão normalizado do índice Calinski-Harabasz;
- SS'_M : média normalizada do *Silhouette Score*;
- SS'_{SD} : desvio-padrão normalizado do *Silhouette Score*;
- V : quantidade de votos.

Por fim, efetuou-se a soma das médias normalizadas com os desvios-padrões também normalizados para cada métrica de

avaliação. Posteriormente foram somados os resultados dos valores resultantes de Calinski-Harabasz com os valores resultantes de *Silhouette Score*. De modo que, ao final, tem-se uma coluna Q na tabela III como *score* consolidado para cada combinação entre método de calibração (sequencial ou aleatória) e método de remoção de *outlier* (sem remoção, IQR, ECOD e LOF) baseados na avaliação qualitativa realizada pelos algoritmos Calinski-Harabasz e *Silhouette Score*.

TABELA III
RESULTADOS OBTIDOS DA SOMA DOS VALORES CONSOLIDADOS

K	O	CH'_{M+SD}	SS'_{M+SD}	Q	V
S	-	0,949	1,875	2,824	1
S	IQR	1,390	1,439	2,830	1
S	ECOD	1,007	1,357	2,364	0
S	LOF	1,109	1,333	2,443	0
A	-	1,154	1,321	2,476	1
A	IQR	1,236	1,625	2,861	2
A	ECOD	1,254	1,464	2,718	1
A	LOF	1,148	1,193	2,341	1

Sendo:

- K : tipo de calibração: sequencial (S) ou aleatório (A);
- O : remoção de *outlier* (nenhum, IQR, ECOD ou LOF);
- CH'_{M+SD} : soma das média e desvio-padrão normalizados do índice Calinski-Harabasz;
- SS'_{M+SD} : soma das média e desvio-padrão normalizados do *Silhouette Score*;
- Q : *score* consolidado;
- V : quantidade de votos.

Deve-se salientar que para dois dos sete participantes os resultados não foram satisfatórios e, embora as condições de posicionamento e luminosidade durante os testes tenham sido as mesmas para todos os participantes, os resultados apresentados para os dois testes mencionados foram imprecisos. Ambos participantes cujos testes não apresentaram resultados fidedignos alegaram certa dificuldade em se concentrarem durante a calibração, mencionando que em alguns momentos desviavam os olhos dos pontos acidentalmente.

Observa-se na tabela III que os métodos que obtiveram maior valor final foram respectivamente: IQR + Calibração aleatória, IQR + Calibração sequencial e Sem remoção de *outlier* + Calibração sequencial. Nota-se que essas combinações apresentaram valores relativamente altos para média e baixos desvios-padrões, apontando uma maior consistência no agrupamento de dados e maior remoção de *outliers*.

Vale ressaltar que entre os métodos abordados no estudo, o IQR é o de mais fácil entendimento e implementação, visto que o método se baseia em um cálculo simples estatístico de quartis.

VI. CONCLUSÃO

O trabalho em questão destacou a importância e os desafios enfrentados para a calibração de um *software Eye Tracking*, um ponto crucial para o sucesso da captura dos dados e precisão dos resultados.

Além disso, a solução proposta para o rastreamento ocular apresentada no estudo possui baixo custo por não demandar *hardware* específico para a captação dos movimentos oculares, diferente dos métodos de bobina de busca escleral, olografia por infravermelho e eletrooculografia. Sendo o método menos invasivo e desconfortável dentre os quatro mencionados.

Para melhorar a calibração do *software* de rastreamento ocular citado, foram escolhidos três algoritmos para realizar a remoção de *outliers* dos dados captados durante a calibração, sendo eles: IQR, ECOD e LOF. Antes do processo de remoção de *outliers*, foi realizado o agrupamento dos dados por meio de um algoritmo de *clusterização*, K -means.

Para avaliar o desempenho dos métodos, foi proposto duas maneiras de avaliação: uma qualitativa, que contou com a opinião dos participantes sobre qual o melhor gráfico de calor apresentado, e outra quantitativa, realizada pelas métricas de avaliação Callinski-Harabasz e *Silhouette Score*.

Durante a realização dos experimentos foram identificados diversos parâmetros ambientais e ergonômicos que influenciam significativamente na captura dos dados, como a iluminação, altura dos olhos em relação à câmera, centralização em relação ao computador, utilização de óculos e a necessidade de manter a cabeça estática durante todo o processo. Esses detalhes notados confirmam a dificuldade de utilização do modelo de rastreamento ocular por olografia por vídeo (VOG).

Após a realização de oito testes com cada um dos sete participantes, foi possível analisar quais métodos tiveram melhores resultados. Na análise qualitativa, o método que obteve maior sucesso na remoção de *outliers*, com $V = 2$ votos, foi a combinação da calibração aleatória com o método de remoção de *outlier* IQR.

De mesmo modo, a combinação da calibração aleatória com o método IQR também obteve maior pontuação na avaliação quantitativa realizada pelas métricas Calinski-Harabasz e *Silhouette Score*, com um *score* consolidado $Q = 2,861$.

Podemos concluir que o modelo de calibração aleatória combinada com o método IQR de remoção de *outlier* apresenta um resultado satisfatório na realização de remoção de valores atípicos identificados na captura de coordenadas durante o processo de calibração, contribuindo com um resultado mais preciso do rastreamento ocular.

REFERÊNCIAS

- [1] Samuel Correia, Fernando Augusto Cunha, Erick Franco, Leonardo José Silva e José Alberto Silva. “Tecnologia Eye Tracking: Aplicações e Implicações para a Indústria 4.0”. Em: *Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Enegep* (2017), pp. 2–5.
- [2] Andrew Duchowski. *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer, Cham, 2007.
- [3] Ana Barreto. “Eye tracking como método de investigação aplicado às ciências da comunicação”. Em: *Revista Comunicando* 1 (2012), pp. 168–186.

- [4] Isayas Berhe Adhanom, Paul MacNeilage e Eelk Folmer. “Eye Tracking in Virtual Reality: a Broad Review of Applications and Challenges”. Em: *Virtual Reality* 27 (2023), pp. 1481–1505.
- [5] Niilo V. Valtakari, Ignace T. C. Hooge, Charlotte Viktorsson, Pär Nyström, Terje Falck-Ytter e Roy S. Hessels. “Eye tracking in human interaction: Possibilities and limitations”. Em: *Behavior Research Methods* 53 (2021), pp. 1592–1608.
- [6] Benjamin T. Carter e Steven G. Luke. “Best practices in eye tracking research”. Em: *International Journal of Psychophysiology* 155 (2020), pp. 49–62. ISSN: 0167-8760.
- [7] Ahmad F Klaib, Nawaf O Alsrehin, Melhem Wasen Y, Haneen O Bashtawi e Aws A Magableh. “Eye tracking algorithms, techniques, tools, and applications with an emphasis on machine learning and Internet of Things technologies”. Em: *Expert Systems with Applications* 166 (2021), p. 114037. ISSN: 0957-4174.
- [8] Hoppen, Joni and Prates, Wladimir. *SpamAssassin Public Mail Corpus*. 2017. URL: <https://www.aquare.la/o-que-sao-outliers-e-como-trata-los-em-uma-analise-de-dados/>.
- [9] Ekta Maini. *Interquartile Range to Detect Outliers in Data*. 2023. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/interquartile-range-to-detect-outliers-in-data/>.
- [10] Zheng Li, Yue Zhao, Xiyang Hu, Nicola Botta, Cezar Ionescu e George H. Chen. “ECOD: Unsupervised Outlier Detection Using Empirical Cumulative Distribution Functions”. Em: *CoRR* abs/2201.00382 (2022).
- [11] Omar Alghushairy, Raed Alsini, Terence Soule e Xiaogang Ma. “A Review of Local Outlier Factor Algorithms for Outlier Detection in Big Data Streams”. Em: *Big Data and Cognitive Computing* 5.1 (2021). ISSN: 2504-2289.
- [12] Erich Schubert, Arthur Zimek e Hans-Peter Kriegel. “Local outlier detection reconsidered: a generalized view on locality with applications to spatial, video, and network outlier detection”. Em: 28 (2014), pp. 190–237.
- [13] Marcelo K Matte e Maria do Carmo Nicoletti. “Revisão de Estratégias para a Aceleração do Algoritmo k-Means”. Em: *Expert Systems with Applications* 166 (2019), pp. 1–6. ISSN: 2447-4703.
- [14] Renato Cruz. *As lições dos Laboratórios Bell*. 2012. URL: <https://www.estadao.com.br/link/renato-cruz/as-licoes-dos-laboratorios-bell/>.
- [15] Cloud Software Group. *O que é aprendizagem não supervisionada?* 2023. URL: <https://www.tibco.com/pt-br/reference-center/what-is-unsupervised-learning>.
- [16] Tussevana Miguel. *K-means Clustering (agrupamento k-means)*. 2023. URL: <https://aprenderdatascience.com/k-means-clustering-agrupamento-k-means/>.
- [17] Bruno Anastaciol. *K-means: o que é, como funciona, aplicações e exemplo em Python*. 2020. URL: <https://medium.com/programadores-ajudando-programadores/k-means-o-que-%C3%A9-como-funciona-aplica%C3%A7%C3%B5es-e-exemplo-em-python-6021df6e2572>.
- [18] Samina. *What is Silhouette Score?* 2023. URL: <https://www.educative.io/answers/what-is-silhouette-score>.
- [19] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort e et al. “Scikit-learn: Machine Learning in Python”. Em: *Journal of Machine Learning Research* 12 (2011), pp. 2825–2830.
- [20] Shubham Koli. “How to evaluate the performance of clustering algorithms using Silhouette Coefficient”. Em: *Medium* (2023). URL: <https://medium.com/@MrBam44/how-to-evaluate-the-performance-of-clustering-algorithms-3ba29cad8c03>.
- [21] Fatih Emre Ozturk. “Unsupervised learning in R: Determination of cluster number”. Em: *Medium* (2023). URL: <https://medium.com/@ozturkfemre/unsupervised-learning-determination-of-cluster-number-be8842cdb11>.
- [22] Gilney Junior. “Qualidade de Agrupamentos (Ciência de Dados) - Gilney Junior - Medium”. Em: *Medium* (2021). URL: <https://medium.com/@gilneyjnr/qualidade-de-agrupamentos-ci%C3%A9ncia-de-dados-4b1176bef5e5>.
- [23] Suzane Pereira Lima e M. D. Soler Cruz. “A genetic algorithm using Calinski-Harabasz index for automatic clustering problem”. Em: *Revista Brasileira De Computação Aplicada* 12 (2020), pp. 97–106.
- [24] Zohreh Sharafi, Bonita Sharif, Yann-Gaël Guéhéneuc, Andrew Begel, Roman Bednarik e Martha Crosby. “A practical guide on conducting eye tracking studies in software engineering”. Em: *Empirical Software Engineering* 25 (2020), pp. 3128–3174.
- [25] Yuqing Li, Yinwei Zhan e Zhuo Yang. “Evaluation of appearance-based eye tracking calibration data selection”. Em: *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)* (2020), pp. 222–224.
- [26] Pritha Bhandari. “How to Find Outliers — 4 Ways with Examples and Explanation”. Em: *Scribbr* (2023). URL: <https://www.scribbr.com/statistics/outliers/>.
- [27] Danasingh Asir Antony Gnana Singh e E. Jebalamar Leavline. “Model-Based Outlier Detection System with Statistical Preprocessing”. Em: *Journal of Modern Applied Statistical Methods* 15 (2016), pp. 789–801.

AUTORES



Rita Elizabeth Santos de Almeida é graduanda em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Técnica em equipamentos médicos pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco Moreira da Costa. Foi bolsista Iniciação Científica no eHealth Innovation Center. Atualmente é estagiária no laboratório eHealth Innovation Center e monitora de

Equipamentos Médicos II.



Isadora Coelho Faggiani é graduanda em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Foi monitora de Física I, Física III e Equipamentos Médicos I, e foi bolsista de Iniciação Científica e estagiária no eHealth Innovation Center.



Leonardo Ribeiro Silva é graduando em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Foi monitor de Transdução de Sinais Biomédicos e Circuitos Elétricos III e bolsista de Iniciação Científica no eHealth Innovation Center de 2021 a 2023. Atualmente é estagiário de Planejamento e Controle de Produção na ProLife Equipamentos Médicos.



Ana Clara Santos é graduanda em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Técnica em Informática pelo Instituto Federal do Sul de Minas (IFSULDEMINAS). Foi pesquisadora de Iniciação Científica no eHealth Innovation Center no Inatel. Foi estagiária em Engenharia Clínica no Hospital das Clínicas Samuel Libânio.



Marcelo Vinícius Cysneiros Aragão é graduado em Engenharia de Computação pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) em 2014 e mestre em Ciência e Tecnologia da Computação pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei) em 2018. Trabalhou de 2011 a 2018 no Inatel Competence Center. É professor de disciplinas de

graduação como Inteligência Computacional e Computação Gráfica, coordenador da pós-graduação em Desenvolvimento

Móvel e Cloud Computing e doutorando em Engenharia de Telecomunicações no Inatel. Suas áreas de interesse incluem ciência de dados e engenharia de *software*.



Juliano Augusto Nascimento Leite é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (2002) e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (2006). Atuou no Hospital Tereza Ramos na cidade de Lages como engenheiro clínico.

Atuou na UNIPLAC - Universidade do Planalto Catarinense como Pró-Reitor de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação, sendo também coordenador do curso de Engenharia Elétrica e professor dos cursos de Engenharia de Produção e Elétrica. Atuou até 2019 como Field Service Engineer na Philips Health-systems e como professor substituto na UNIFEI. Atualmente é professor auxiliar do quadro de Engenharia Biomédica e coordenador da pós-graduação em Engenharia Clínica e Engenharia Biomédica do Inatel. Também é engenheiro de desenvolvimento na empresa Neurotec.

Desenvolvimento de aplicativo de teste de trilhas para avaliação da aprendizagem motora em idosos

Victor Arruda Gorgal, Elisa Rennó Carneiro Dester, Luma Rissatti Borges do Prado, Rita Elizabeth Santos de Almeida
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
victor.arruda@ges.inatel.br, elisa.renno@inatel.br, luma.prado@inatel.br, r.elizabeth@inatel.br

Abstract—With the projection that 32% of the Brazilian population will be elderly by 2060, there is an increasing need for tools to assess motor learning and cognitive aging in this demographic. The Trail Making Test (TMT) is a widely used tool to assess executive functions related to planning and motor activity. This project proposes the development of a mobile version of the TMT with integrated biofeedback - a strategy that aims to increase the chances of learning and information absorption, aiming to adapt the evaluation to a more engaging and interactive environment using a mobile application. The app was developed with different environments for each part of the test, including training, retention, and transfer.

Index Terms—Biofeedback, Trail Making Test, Elderly, Application

Resumo—Com a estimativa de que 32% da população brasileira será composta por idosos até 2060, é cada vez mais necessário o desenvolvimento de ferramentas para avaliar a aprendizagem motora e o envelhecimento cognitivo dessa população. O Teste de Trilhas (*Trail Making Test* - TMT) é um instrumento amplamente utilizado para avaliar funções executivas associadas ao planejamento e à atividade motora. Este projeto propõe o desenvolvimento de uma versão virtual do TMT com *biofeedback*, que é uma estratégia que visa aumentar as chances de aprendizagem e absorção de informações, com o objetivo de adaptar a avaliação para um ambiente mais atrativo e interativo, utilizando um aplicativo móvel. O aplicativo foi desenvolvido com diferentes ambientes para cada parte do teste, incluindo treino, retenção e transferência.

Palavras chave—*Biofeedback*, Teste de Trilha, Idosos, Aplicativo

I. INTRODUÇÃO

O envelhecimento da população brasileira é um fenômeno crescente e irreversível. De acordo com projeções do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), estima-se que, até 2060, 32% da população do país será composta por idosos [1, 2]. Esse aumento da longevidade é resultado de diversos fatores, como os avanços na medicina, melhorias no acesso à saúde e mudanças nos hábitos de vida. No entanto, junto com esse crescimento, surgem desafios relacionados ao declínio das funções cognitivas e motoras, que impactam diretamente a qualidade de vida e a independência dos idosos. Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na avaliação e no acompanhamento dessas funções, permitindo diagnósticos precoces e intervenções mais eficazes [3].

Dentre os instrumentos utilizados para essa finalidade, o Teste de Trilhas (*Trail Making Test* – TMT) se destaca como um método amplamente empregado na avaliação de funções executivas, planejamento e atividade motora [3, 4]. Esse teste exige que o participante estabeleça conexões entre estímulos

visuais seguindo uma sequência específica, demandando habilidades como atenção, velocidade de processamento e flexibilidade cognitiva. Apesar de sua eficácia, o TMT tradicional, feito em folha de papel, apresenta algumas limitações, como a falta de engajamento por parte dos participantes, especialmente em populações mais idosas [5].

O TMT é considerado como uma avaliação neuropsicológica amplamente utilizada e é composto por duas partes: na Parte A, o paciente deve conectar, em ordem crescente, uma sequência de números distribuídos aleatoriamente em uma folha de papel; já na Parte B, a tarefa envolve alternar entre números e letras em ordem crescente (por exemplo, 1-A-2-B) como pode ser visualizado na Figura 1. O tempo necessário para completar cada parte do teste é registrado, sendo que um desempenho mais lento pode indicar dificuldades cognitivas associadas a diversas condições neurológicas, como demência, lesões cerebrais e transtornos atencionais.

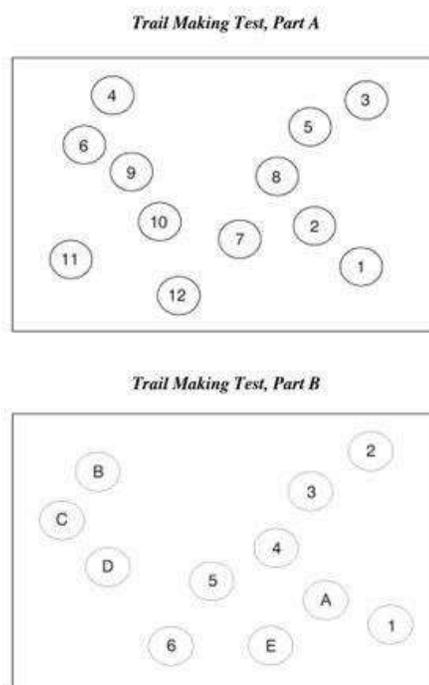


Fig. 1. Exemplos de trilhas A e B

Nesse contexto, o *biofeedback* surge como uma estratégia promissora para tornar a experiência de avaliação mais atrativa e eficiente. Ele consiste na aplicação de *feedback* visual

imediatamente na forma de cores, com o objetivo de aumentar a motivação e a obtenção de informações. Estudos indicam que a introdução de técnicas como essa podem melhorar a experiência dos pacientes e do profissional de saúde, tornando o processo de avaliação mais dinâmico e envolvente [5].

Diante desse cenário, este projeto propõe o desenvolvimento de uma versão virtual com *biofeedback* do TMT, por meio de um aplicativo móvel. Com essa abordagem, espera-se oferecer uma ferramenta inovadora para a avaliação das funções cognitivas e motoras em idosos, contribuindo para um melhor envelhecimento cognitivo.

II. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do aplicativo, optou-se pelo *framework* multiplataforma *Flutter*, devido à sua facilidade de desenvolvimento em comparação com alternativas como o *Android* nativo. Além disso, o *Flutter* apresenta uma menor incidência de *bugs*, especialmente aqueles relacionados à invasão de memória, que são comuns na navegação entre telas no *Android* nativo.

A interface do aplicativo foi projetada com base nas etapas do TMT convencional e está organizada em duas seções: Avaliação e Treino. Cada uma dessas seções contém dois tipos de trilhas, A e B.

Ao iniciar o aplicativo, o profissional deve selecionar qual trilha da área de avaliação será realizada. A seção de Avaliação é composta por 4 testes: 2 testes do tipo A (Trilha A - exemplo e Trilha A - teste) e 2 testes do tipo B (Trilha B - exemplo e Trilha B - teste) como pode ser visualizado na Figura 2.



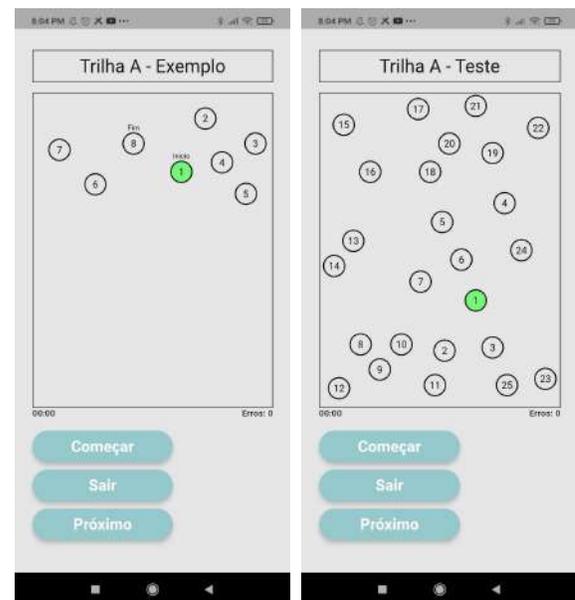
Fig. 2. Tela de escolha de trilhas de avaliação

O paciente deve concluir todos os testes da Trilha A antes de avançar para a Trilha B. Caso opte por iniciar pela Trilha B, ele deve concluir os testes dessa trilha antes de encerrar. A seção de treino não está disponível inicialmente e só é possível utilizá-la após a conclusão da avaliação. A área de treino inclui 6 testes, sendo 3 da Trilha A e 3 da Trilha B como pode ser visto na Figura 3.



Fig. 3. Tela da escolha de trilhas

As trilhas de avaliação são compostas por duas etapas: uma etapa de exemplo e uma etapa de avaliação principal. Tanto a Trilha A quanto a Trilha B incluem essas duas etapas, sendo a de exemplo uma versão simplificada da avaliação principal, com menos pontos e menor complexidade, servindo como um treino introdutório para o paciente antes do teste real, já a avaliação principal, apresenta uma sequência mais extensa e desafiadora, como pode ser visto na Figura 4.



(a) Trilha exemplo

(b) Trilha de teste

Fig. 4. Diferença entre trilha de exemplo e de teste

A Trilha A segue uma ordem numérica crescente (1, 2, 3...) como visto na Figura 5.

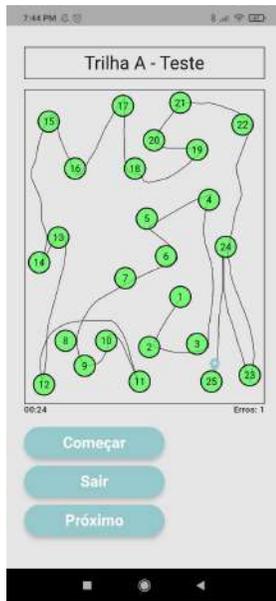


Fig. 5. Trilha A

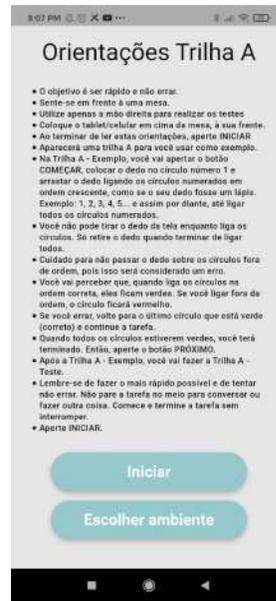


Fig. 7. Orientacoes para trilha A

Enquanto a Trilha B alterna entre números e letras (1, A, 2, B, 3, C...) como pode ser visualizado na Figura 6

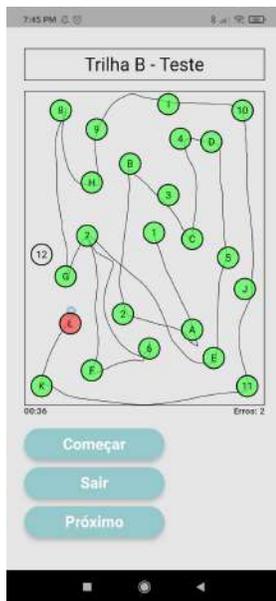


Fig. 6. Trilha B

Nessa tela, o profissional pode optar por iniciar a trilha escolhida ou selecionar "Escolher Ambiente", onde terá acesso às quatro opções disponíveis: Trilha A - Exemplo, Trilha A - Teste, Trilha B - Exemplo e Trilha B - Teste.

Durante a execução do teste, o paciente deve clicar no botão "Começar", ativando um temporizador que registra o tempo utilizado para completar a trilha. Além disso, há as opções "Sair", que interrompe o teste atual e leva diretamente para a tela de resultados, e "Próximo", que só fica disponível após a conclusão do teste e permite avançar para o próximo teste.

Ao finalizar todos os testes, uma tela de resultados exibe o tempo gasto e a quantidade de erros cometidos em cada trilha, como pode ser visto na Figura 8.



Fig. 8. Tela de resultados

Antes de iniciar qualquer trilha, é exibido uma tela de instruções detalhadas sobre como realizar o teste que deverá ser exibida ao paciente, como pode ser visto na Figura 7.

Após fechar essa tela, o aplicativo pergunta se o paciente deseja treinar sua habilidade motora. Caso ele escolha "Não", será redirecionado à página principal. Caso escolha "Sim",

acessará um modo de treinamento que contém seis testes adicionais: Trilha A - Nível 1 a 3 e Trilha B - Nível 1 a 3. Esses testes funcionam da mesma maneira que os anteriores, e, ao final, uma nova tela de resultados será exibida.

Inicialmente o aplicativo foi desenvolvido para a plataforma *Android*, mas com possibilidades de integração com *iOS*. Após a definição do escopo e *design*, o aplicativo passou pela aprovação do comitê de ética.

III. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Após o desenvolvimento do aplicativo, em parceria com a mestrandia de Fisioterapia da Universidade Federal de Alfenas, Mônica Cássia Bernardo de Souza, foram realizados testes com 36 participantes, conforme aprovado pelo comitê de ética. O estudo foi aprovado pelo comitê de ética da UNIFAL-MG sob o CAAE 67295923.3.0000.5142 e seguiu as diretrizes éticas estabelecidas pela Resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde (CNS), garantindo a integridade e autonomia dos participantes. Os testes permitiram avaliar tanto a usabilidade do sistema quanto sua eficácia na reprodução das etapas do TMT convencional.

Em relação à interface, o *design* do aplicativo foi desenvolvido com foco na simplicidade e acessibilidade, especialmente para idosos, público-alvo do estudo. A divisão entre Trilha A e Trilha B, bem como a inclusão de testes introdutórios, facilitou a adaptação ao formato digital do TMT.

O funcionamento do aplicativo demonstrou estabilidade, sem ocorrência de erros ou falhas que comprometessem a execução dos testes. A escolha do *Flutter* como *framework* provou-se correta, garantindo um desempenho fluido e uma experiência de usuário satisfatória. Além disso, a implementação do temporizador automático e do registro de erros possibilitou a coleta precisa de dados, aspecto essencial para a análise do desempenho motor dos participantes, considerando que no TMT convencional a contagem do tempo é realizada de forma manual pelo profissional de saúde, uma ação passível de falhas. O *Flutter* também se mostrou uma ferramenta essencial para o desenvolvimento do projeto devido à sua capacidade de portar o aplicativo para dispositivos *iOS* além do *Android* com facilidade, permitindo maior acessibilidade e ampliação do público-alvo.

O aplicativo também demonstrou um funcionamento responsivo, adaptando-se bem a diferentes dispositivos e resoluções de tela. A interface manteve sua usabilidade tanto em *smartphones* quanto em *tablets*, garantindo acessibilidade ao usuário independentemente do dispositivo utilizado. Essa flexibilidade reforça o potencial do aplicativo como uma ferramenta prática para avaliação motora digitalizada, podendo ser utilizada em diferentes contextos sem comprometer a experiência do usuário.

Durante os testes, foi identificado um *bug* relacionado à detecção de toques nos pontos da trilha. Em algumas situações, quando o paciente deslizava o dedo rente à borda do ponto e contornava-o sem necessariamente passar pelo centro, o sistema poderia registrar essa ação como um acerto seguido imediatamente por um erro, de forma indevida. Para corrigir esse problema, implementou-se um mecanismo de histerese na detecção dos toques: ao entrar em um ponto, o aplicativo

utiliza um raio menor para validar a interação e, uma vez dentro dele, esse raio é expandido, evitando que pequenas variações na trajetória do toque sejam erroneamente interpretadas como saídas e entradas sucessivas. Essa solução tornou a experiência mais intuitiva e menos frustrante para o paciente.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um aplicativo móvel para a versão digital do TMT com *biofeedback*, buscando tornar a avaliação cognitiva e motora de idosos mais acessível e eficiente. Com o envelhecimento da população, é essencial criar ferramentas que facilitem o acompanhamento clínico e incentivem o engajamento dos pacientes, sem comprometer a eficácia dos testes tradicionais.

O aplicativo foi desenvolvido utilizando o *framework Flutter*, garantindo uma navegação fluida e minimizando problemas comuns de desenvolvimento. A estrutura do teste seguiu o modelo convencional do TMT, com instruções detalhadas, temporização automática e um sistema de *feedback* visual para tornar a experiência mais dinâmica. Além disso, a inclusão de um modo de treinamento permitiu que os pacientes praticassem antes de uma nova avaliação, ajudando a reduzir a frustração e melhorar o desempenho.

Durante os testes, foi possível identificar e corrigir problemas na detecção dos toques, implementando um mecanismo de histerese que aumentou a precisão da interação. Com isso, o sistema se tornou mais confiável, garantindo que a experiência do usuário fosse a mais intuitiva possível.

No geral, o aplicativo se mostrou uma ferramenta promissora para a avaliação neuropsicológica, aliando tecnologia e acessibilidade. Melhorias futuras podem incluir novos tipos de *biofeedback*, como vibração e áudio, para tornar a experiência ainda mais imersiva e adaptável às necessidades dos usuários.

O Teste de Trilhas desenvolvido neste estudo apresenta uma interface intuitiva e acessível, facilitando seu uso tanto por profissionais quanto por pacientes. A escolha do *framework Flutter* se destacou por sua versatilidade, garantindo um desempenho estável e responsivo. Além disso, sua compatibilidade com *Android* e possibilidade de integração com *iOS* ampliam o alcance da ferramenta, tornando-a uma alternativa viável para pesquisas e avaliações na área da aprendizagem motora.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao eHealth Innovation Center pelo apoio oferecido ao projeto e à Universidade Federal de Alfenas pela parceria. Agradecemos também à Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (FINATEL) pelo suporte financeiro e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de pesquisa.

V. REFERÊNCIAS

[1] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de saúde: Ciclos de vida – Brasil e Grandes Regiões. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv94522.pdf>

[2] DOS SANTOS SILVA, Aline et al. Envelhecimento populacional: realidade atual e desafios. *Global Academic Nursing Journal*, v. 2, n. Sup. 3, p. e188- e188, 2021.

[3] SALTHOUSE, Timothy A. Trajectories of normal cognitive aging. *Psychology and aging*, v. 34, n. 1, p. 17, 2019.

[4] SOUZA, D. E.; FRANÇA, F. R.; CAMPOS, T. F. Teste de labirinto: instrumento de análise na aquisição de uma habilidade motora. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, v. 10, p. 355-360, 2006.

[5] BRACKEN, Magdalene R. Trail making test: comparison of paper-and-pencil version with electronic version. 2017. Tese de Doutorado. The Chicago School of Professional Psychology.

Moreira da Costa. Especialista em sistemas no Inatel, atuando como coordenadora de projetos no eHealth

Innovation Center.

AUTORES

Victor Arruda Gorgal Graduando em Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações, técnico em automação industrial pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco Moreira da Costa, bolsista no laboratório do eHealth.



ORIENTADOR

Luma Rissatti Borges do Prado Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, mestranda em Engenharia Biomédica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Professora no curso de Engenharia Biomédica do Inatel e professora do curso técnico em equipamentos biomédicos da ETE "FMC". Orientadora de projetos do centro de pesquisas em Engenharia Biomédica eHealth



Innovation Center.

CO-ORIENTADORES

Elisa Rennó de Carneiro Dester Fisioterapeuta formada pela Universidade Gama Filho (RJ) em 1999; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela Universidade Castelo Branco (RJ) em 2003; Professora do curso de pós-graduação em Engenharia Clínica e Biomédica do Inatel; Professora do curso de Engenharia Biomédica do Inatel.



Rita Elizabeth Santos de Almeida Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, técnica em equipamentos médicos pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco



Agnos: Plataforma para Detecção de Alzheimer por meio de Redes Neurais Convolucionais e Ressonância Magnética

Raquel Andrea Calderon, Maria Rene Ledezma Flores

Universidad Privada del Valle - Univalle (Bolivia)
cgr2019304@est.univalle.edu, mledezmaf@univalle.edu

ORCID: 0009-0007-5208-3345

Abstract—Alzheimer’s disease is a neurodegenerative disorder that progressively leads to the death of brain nerve cells, affecting memory, decision making, and behavior. Early diagnosis is crucial, but conventional methods often lack precision and timeliness. This paper presents the design and development of a platform based on artificial intelligence and convolutional neural networks (CNNs) for the automated analysis of brain magnetic resonance imaging (MRI). The platform detects characteristic patterns of the disease, enabling a more accurate and timely diagnosis. This tool aims to optimize the work of specialists and improve the quality of life of patients through early detection and appropriate treatment.

Index Terms—Alzheimer’s diagnosis, dementia, deep learning, magnetic resonance imaging.

Resumo—A doença de Alzheimer é um transtorno neurodegenerativo que provoca a morte progressiva das células nervosas do cérebro, afetando a memória, a tomada de decisões e o comportamento. Seu diagnóstico precoce é crucial, mas os métodos convencionais podem ser imprecisos e demorados. Este trabalho apresenta o design e desenvolvimento de uma plataforma baseada em inteligência artificial e redes neurais convolucionais (CNNs) para a análise automatizada de imagens de ressonância magnética cerebral. A plataforma identifica padrões característicos da doença, facilitando um diagnóstico mais preciso e oportuno. Com essa ferramenta, busca-se otimizar o trabalho dos especialistas e melhorar a qualidade de vida dos pacientes por meio da detecção precoce e de um tratamento adequado.

Palavras chave—Alzheimer, Diagnóstico, Deep Learning, Demência, Ressonância Magnética.

I. INTRODUÇÃO

A doença de Alzheimer é uma demência neurodegenerativa progressiva caracterizada pela perda gradual da memória, pelo declínio cognitivo e por mudanças no comportamento. Segundo Romano et al. [1], um dos sintomas mais precoces e pronunciados é o déficit de memória, seguido por dificuldades na percepção, na linguagem e nas emoções, o que afeta significativamente a autonomia do paciente. Além disso, o Alzheimer está associado a diversos problemas fisiológicos que requerem atenção médica contínua. A doença é uma das principais causas de morte em países desenvolvidos, ficando atrás apenas das doenças cardiovasculares e do câncer. Nas últimas duas décadas, a incidência do Alzheimer aumentou 145% em nível global [2], tornando-se a principal causa de incapacidade em idosos e gerando uma grande sobrecarga econômica e psicológica para as famílias e os sistemas de saúde [3]. Na Bolívia, o Alzheimer continua sendo um problema pouco estudado e documentado. Não há dados precisos sobre o número de pessoas afetadas e, no âmbito da saúde, o

conhecimento sobre neurologia é limitado. Isso faz com que mais de 90% dos casos não sejam diagnosticados nem tratados adequadamente [4], o que atrasa a intervenção e agrava a progressão da doença. Nesse contexto, os avanços em Inteligência Artificial (IA) abriram novas possibilidades para melhorar o diagnóstico do Alzheimer. As técnicas de *Machine Learning* e *Deep Learning* permitem a detecção automática de padrões em imagens médicas, facilitando a classificação de dados e a redução de ruídos em imagens de ressonância magnética cerebral [5]. Essas ferramentas tornaram-se recursos computacionais essenciais para identificar anomalias associadas à doença e fornecer um diagnóstico mais rápido, preciso e objetivo [6]. Este trabalho apresenta o design e o desenvolvimento de uma plataforma baseada em redes neurais convolucionais (CNNs) para a detecção de padrões morfológicos cerebrais associados ao Alzheimer. A implementação dessa tecnologia otimiza a precisão diagnóstica e melhora a eficiência do fluxo de trabalho clínico, garantindo a segurança e o bem-estar dos pacientes sem comprometer sua independência.

II. METODOLOGIA

A. Coleta de Dados

O sucesso de um modelo de *Deep Learning* depende, em grande parte, da qualidade dos dados utilizados para seu treinamento. No caso do diagnóstico de Alzheimer, é fundamental dispor de imagens de ressonância magnética (MRI) de alta qualidade, permitindo que a rede neural identifique padrões distintivos entre pacientes com a doença e indivíduos saudáveis.

Foram explorados diversos bancos de dados públicos e repositórios especializados para selecionar o conjunto de dados mais adequado. Após uma análise detalhada, optou-se por utilizar o banco de dados do *The Alzheimer’s Disease Neuroimaging Initiative (ADNI)*, um recurso amplamente utilizado em pesquisas médicas e de inteligência artificial.

O acesso aos dados foi obtido por meio de uma solicitação formal à instituição, o que permitiu o download das imagens sem restrições. Neste estudo, foram utilizadas três categorias de diagnóstico: AD (*Alzheimer’s Dementia*), MCI (*Mild Cognitive Impairment*) e CN (*Cognitively Normal*), gerando uma saída com múltiplas classes para o modelo. No total, foram coletadas 23.045 imagens, distribuídas em 7.622 de pacientes com Alzheimer, 7.712 de pacientes com deterioração cognitiva

leve e 7.711 de pessoas saudáveis. As imagens utilizadas foram extraídas de 6 conjuntos da base ADNI, os quais se diferenciam pelo tempo de acompanhamento dos pacientes (1Yr, 2Yr, 3Yr, correspondendo a 1, 2 ou 3 anos) e pelo tipo de scanner empregado na aquisição das imagens (1.5T ou 3T, onde T indica Tesla, unidade de medida do campo magnético da ressonância magnética). A Tabela I mostra a centralização de todas as imagens utilizadas.

TABELA I
CENTRALIZAÇÃO DOS DADOS DOS CONJUNTOS DE DADOS UTILIZADOS

Conjunto	Imagens AD	Imagens CN	Imagens MCI
2Yr 1.5T	1.450	1.475	1.460
1Yr 1.5T	1.456	1.472	1.485
2Yr 3T	1.087	1.095	1.100
3Yr 3T	1.082	1.091	1.102
3Yr 1.5T	1.454	1.483	1.495
2Yr 3T	1.093	1.115	1.116
Total	7.622	7.711	7.712

Os conjuntos de dados utilizados para o desenvolvimento e avaliação da plataforma são divididos em três categorias principais: treinamento, validação e teste. Neste caso, foi atribuído 70% do total de imagens à fase de treinamento, enquanto os 30% restantes são distribuídos entre os conjuntos de validação e teste. Cada classe nos conjuntos de dados possui uma quantidade diferente de imagens, mas a distribuição em termos de percentual é consistente entre os três conjuntos. Os detalhes da quantidade de imagens por classe para cada conjunto são apresentados na Tabela II.

TABELA II
DISTRIBUIÇÃO DAS IMAGENS POR CLASSE NOS CONJUNTOS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTE.

Classes	Treinamento	Validação	Teste	Total
AD	5335	2237	50	7622
CN	5397	2264	50	7711
MCI	5398	2264	50	7712

As imagens estavam no formato *NIFTI* (Figura 1), um padrão tridimensional em neuroimagem que encapsula múltiplos cortes de ressonância magnética. Para visualizar e processar esses dados, foi utilizada a ferramenta ITK-SNAP, especializada em imagens médicas. Como parte do pré-processamento, foi extraído o corte coronal, sagital e axial central de cada imagem e normalizado o seu tamanho para garantir uniformidade no treinamento do modelo.

B. Treinamento de uma rede neural convolucional (CNN)

Para a classificação de imagens de Alzheimer, optou-se por utilizar Redes Neurais Convolucionais (CNNs), um tipo de *Deep Learning* amplamente utilizado na detecção de padrões em imagens médicas. Antes de prosseguir com o treinamento, foi realizada uma fundamentação teórica de diferentes arquiteturas de CNN e técnicas como *transfer learning* e extração de características.

b.1) Arquitetura do Modelo

As CNNs são modelos inspirados no funcionamento do cérebro humano, organizados em camadas de convolução, ativação e *pooling* que permitem identificar estruturas relevantes em imagens [8]. O aprendizado profundo se baseia na

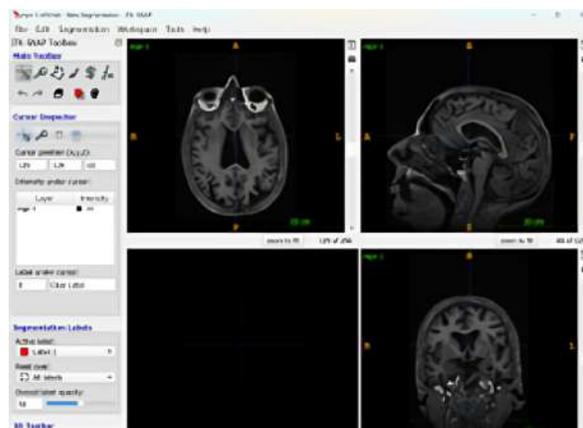


Fig. 1. Visualização de imagens no formato NIFTI

capacidade do modelo de extrair representações de alto nível sem a necessidade de projetar manualmente as características [9]. Para este estudo, o treinamento da rede neural envolveu os seguintes passos:

- **Conversão de imagens:** As imagens *NIFTI* foram transformadas para o formato PNG para facilitar o processamento, utilizando Python.
- **Pré-processamento:** O tamanho de todas as imagens foi ajustado e os valores dos pixels foram normalizados.
- **Definição da arquitetura CNN:** Foi selecionada uma arquitetura baseada em modelos previamente treinados, como VGG16 ou ResNet, adaptados para a tarefa de classificação de Alzheimer.
- **Treinamento e validação:** Foi implementado um treinamento em larga escala utilizando *TensorFlow*, testando diferentes configurações de hiperparâmetros (Tabela III).

TABELA III
POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DE PARÂMETROS DO MODELO.

Parâmetro	Possíveis Configurações		
Neurônios na Camada Convolutiva	64	128	
Camadas Densas	0	1	2
Camadas Convolucionais	0	1	2
Dropout	0 (Sem Dropout)	1 (Com Dropout)	

b.2) Avaliação do Modelo e Otimização

Isso implicou o treinamento de modelos com conjuntos de dados de imagens rotuladas e a realização de testes exaustivos para avaliar seu desempenho, com foco na métrica de precisão. Nas Figuras 2 e 3 podem ser observados os resultados do teste massivo dos modelos, os quais serviram de base para a definição da arquitetura detalhada na seção de resultados.

É importante destacar que foram realizados análises mais detalhadas e comparativas dos resultados, levando em consideração os diferentes hiperparâmetros e características de cada modelo neuronal. Essas análises permitiram identificar os modelos com os melhores desempenhos e ajustes ótimos, com o objetivo de selecionar o modelo final para a classificação das imagens relacionadas com a doença de Alzheimer.

Uma vez obtido o modelo ótimo, procedeu-se com sua implementação em uma plataforma web acessível para médicos e especialistas. Para isso, foi desenvolvida uma interface gráfica que permite:

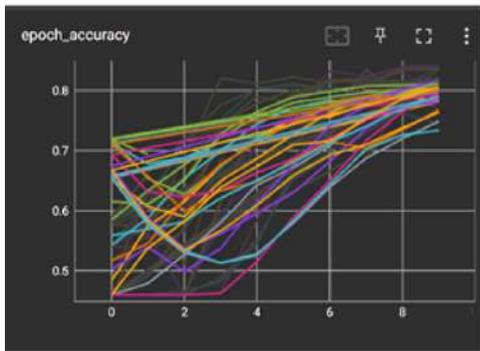


Fig. 2. Gráfico da precisão do treinamento massivo.

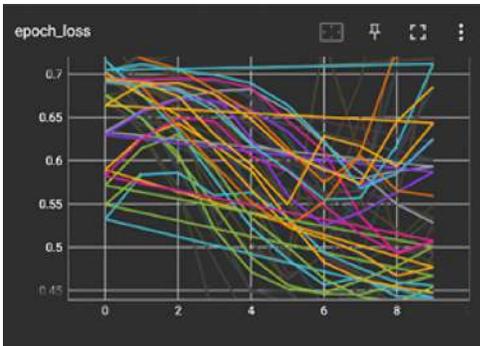


Fig. 3. Gráfico da perda do treinamento massivo.

- Carregar imagens de ressonância magnética.
- Executar a análise por meio da CNN treinada.
- Visualizar o resultado da classificação de forma clara e acessível.

Para a implementação, foram utilizadas tecnologias como *Python (Flask/Django)*, *TensorFlow*, *Bootstrap* e *MySQL*. A integração da CNN ao sistema permite aos profissionais de saúde diagnosticar Alzheimer de forma mais rápida e precisa, otimizando o fluxo de trabalho clínico.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Análise das camadas do modelo

O modelo de arquitetura escolhido é uma rede neural convolucional (CNN) composta por várias camadas para processar e extrair características das imagens de Alzheimer. O modelo *Sequential do Keras* foi utilizado para construir a rede, oferecendo uma interface fácil de usar para construir, configurar, treinar e avaliar redes neurais sequenciais. Foram definidas as seguintes camadas:

- **Camada de convolução:** Foi utilizada uma camada Conv2D com 32 filtros de tamanho 3x3 e função de ativação ReLU. Esta camada processa a imagem de entrada de tamanho 299x299 pixels e extrai características relevantes por meio da convolução.
- **Camada de max pooling:** Foi adicionada uma camada *MaxPooling2D* com uma janela de 2x2 para reduzir o tamanho espacial das características e preservar as mais importantes.
- **Camada de convolução adicional:** Foi adicionada outra camada Conv2D com 64 filtros de tamanho 3x3 e função de ativação ReLU para continuar extraindo características mais complexas das imagens.

- **Camada de max pooling adicional:** Foi aplicada novamente uma camada *MaxPooling2D* com uma janela de 2x2 para reduzir ainda mais o tamanho das características e preservar as mais relevantes.
- **Camada de convolução final:** Foi incluída uma terceira camada Conv2D com 128 filtros de tamanho 3x3 e função de ativação ReLU para capturar características mais sofisticadas nas imagens.
- **Camada de max pooling final:** Foi aplicada uma última camada *MaxPooling2D* com uma janela de 2x2 para reduzir o tamanho espacial das características resultantes.
- **Camada de achatamento:** Foi adicionada uma camada *Flatten* para converter as características extraídas em um vetor unidimensional de 25.088 neurônios, preparando-as para a etapa de classificação.
- **Camada densa:** Foi incluída uma camada Dense com 128 unidades e função de ativação ReLU, que permite a conexão total entre os neurônios para realizar operações mais complexas e aprender padrões mais sofisticados.
- **Camada Dropout:** Foi adicionada uma camada *Dropout* com taxa de 0,5 que desativa aleatoriamente 50% dos neurônios durante o treinamento, prevenindo o sobreajuste e melhorando a generalização do modelo.
- **Camada de saída:** Foi utilizada uma camada Dense final com 3 unidades e função de ativação *softmax* para realizar a classificação multiclasse das imagens, onde cada unidade representa uma das três classes.

Esta arquitetura de rede neural CNN, apresentada na Figura 4, foi selecionada devido à sua capacidade de extrair características significativas das imagens de Alzheimer e realizar uma classificação precisa.

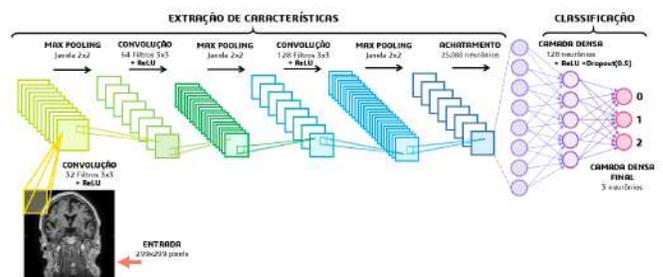


Fig. 4. Estrutura da Rede Neural Convolucional Escolhida.

Para a compilação do modelo, foram levados em consideração os seguintes parâmetros:

- **Otimizador:** Foi utilizado o otimizador 'adam', que é um algoritmo de otimização amplamente utilizado em redes neurais. O otimizador 'adam' se adapta automaticamente à taxa de aprendizado e ajusta os pesos das conexões entre os neurônios para minimizar a função de perda durante o treinamento.
- **Função de perda:** Foi especificada a 'sparse_categorical_crossentropy' como a função de perda. Esta função de perda é comumente utilizada em problemas de classificação multiclasse, onde o objetivo é minimizar a diferença entre as previsões do modelo e os rótulos inteiros reais das amostras de treinamento.

- **Métricas:** Foi definida uma métrica de avaliação do modelo, neste caso, 'accuracy' (acurácia). A acurácia mede a proporção de amostras classificadas corretamente em relação ao total de amostras. É uma métrica comumente utilizada para avaliar o desempenho de modelos de classificação.

Na Figura 5, é apresentado um diagrama completo da estrutura e dos parâmetros considerados para o treinamento da CNN escolhida, realizando o processo durante 16 épocas, com um tempo de treinamento de 1 hora no ambiente do Google Colab.

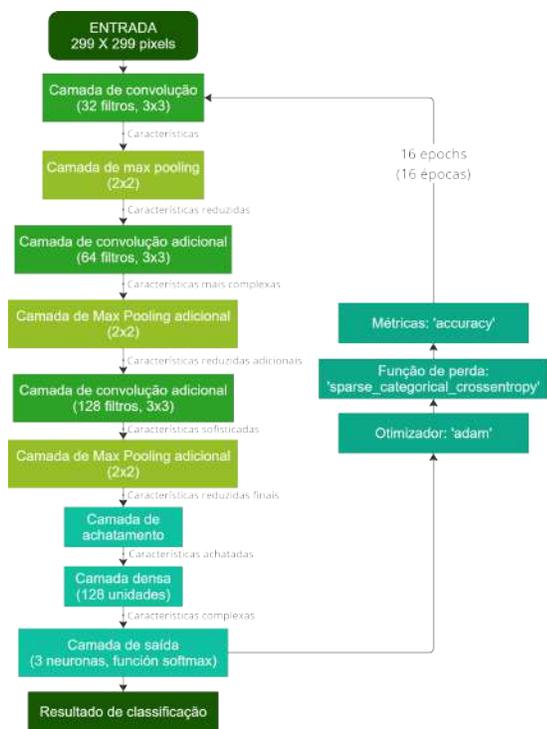


Fig. 5. Diagrama Completo da Estrutura e Parâmetros escolhidos para a CNN.

O resultado do treinamento executado na plataforma Google Colab do modelo escolhido está representado na Figura 6, onde é possível observar o gráfico de precisão e perda, que mostra como a precisão do modelo aumenta à medida que o treinamento avança e a perda diminui progressivamente. A precisão representa a proporção de previsões corretas realizadas pelo modelo, enquanto a perda reflete a diferença entre as previsões do modelo e os valores reais. Um comportamento esperado é que a precisão continue melhorando e a perda continue diminuindo, o que indica que o modelo está aprendendo de maneira eficaz durante o processo de treinamento.

Em relação a esses resultados, é importante mencionar que ocorreu um caso de sobreajuste. O sobreajuste, também conhecido como *overfitting*, é um fenômeno comum no treinamento de modelos de aprendizado de máquina. Isso acontece quando o modelo se ajusta excessivamente aos dados de treinamento e não generaliza corretamente para novos dados de teste. Como mencionado no artigo "Deep Learning" de Goodfellow et al. [8], o sobreajuste pode ocorrer quando o modelo tem uma capacidade excessiva em relação à quantidade de dados de treinamento disponíveis e pode diminuir o desempenho

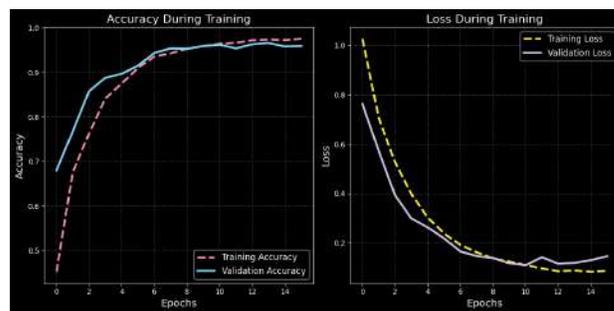


Fig. 6. Treinamento executado no Google Colab

do modelo ao confrontá-lo com novos dados. Para mitigar esse problema, é importante usar técnicas como regularização, conjuntos de dados maiores ou validação cruzada, que ajudam a melhorar a generalização do modelo.

B. Testes de funcionamento e Matriz de Confusão

Após treinar o modelo, foram realizados testes utilizando o conjunto de imagens do banco de testes para avaliar seu desempenho. Durante essa etapa, diversas métricas foram calculadas e registradas para avaliar a performance do modelo treinado. Os resultados obtidos revelaram um desempenho altamente satisfatório e ótimo do modelo em relação às métricas avaliadas. Esses achados respaldam a eficácia e a capacidade do modelo treinado para realizar previsões confiáveis no contexto específico.

Da mesma forma, foi realizada a construção da Matriz de Confusão correspondente ao modelo treinado. A Matriz de Confusão, ver Figura 7, é uma ferramenta fundamental para avaliar o desempenho de um modelo de classificação [10]. Essa matriz permite visualizar de maneira clara a quantidade de amostras classificadas corretamente e incorretamente para cada uma das classes [11].

		true class		
		A	B	C
predicted class	A	TP _A	E _{BA}	E _{CA}
	B	E _{AB}	TP _B	E _{CB}
	C	E _{AC}	E _{BC}	TP _C

(b)

Fig. 7. Matriz de Confusão.

A matriz de confusão mostra o desempenho do modelo através de:

- **TP (Verdadeiros Positivos):** Instâncias classificadas corretamente em sua classe real (diagonal principal). Ex: TP_A são instâncias da classe A preditas como A.
- **E (Erros):** Instâncias classificadas incorretamente (fora da diagonal). Ex: E_{BA} são instâncias da classe B preditas como A.

A interpretação da Matriz de Confusão da Figura 8 permitiu fornecer uma visão das forças e fraquezas do modelo treinado, por meio da identificação de quantas amostras de cada classe foram corretamente classificadas e quantas foram classificadas

incorretamente. Isso permitiu avaliar a sensibilidade e especificidade do modelo na detecção da doença de Alzheimer, além de identificar possíveis áreas de melhoria ou ajustes [12].

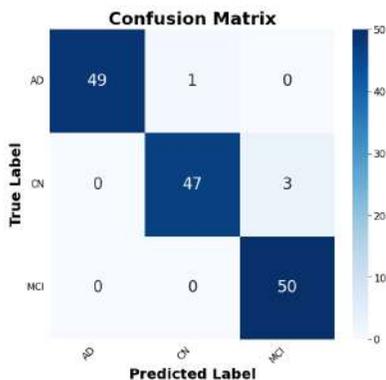


Fig. 8. Matriz de Confusão.

A precisão de uma matriz de confusão para um problema de classificação multiclasse é calculada usando a seguinte fórmula:

$$\text{Precisão} = \frac{\sum_{i=1}^N (TP_i + FP_i)}{\sum_{i=1}^N TP_i} \quad (1)$$

Onde TP_i representa os verdadeiros positivos e FP_i os falsos positivos para cada classe i . Esta fórmula permite avaliar quão precisas foram as previsões da rede neural ao considerar os resultados obtidos para cada classe. Para calcular o percentual de precisão da rede neural, aplica-se a equação anterior com os valores fornecidos pela matriz de confusão. Isso permitirá determinar o desempenho do modelo ao classificar corretamente os elementos dentro das diferentes classes.

A precisão de uma classe específica i é calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Precisão para classe } i = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \quad (2)$$

Onde TP_i representa os verdadeiros positivos e FP_i os falsos positivos para a classe i . A seguir, são apresentados os resultados da precisão para cada classe:

- Para a Classe AD:

$$\text{Precisão para a classe AD} = \frac{49}{49 + 0} = \frac{49}{49} \approx 1.000$$

- Para a Classe CN:

$$\text{Precisão para a classe CN} = \frac{47}{47 + 1} = \frac{47}{48} \approx 0.979$$

- Para a Classe MCI:

$$\text{Precisão para a classe MCI} = \frac{50}{50 + 3} = \frac{50}{53} \approx 0.943$$

Além disso, para obter a precisão média de todas as classes, utiliza-se a fórmula:

$$\text{Precisão Média} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \quad (3)$$

Isso permite avaliar o desempenho geral do modelo, considerando as precisões de cada classe no problema de classificação

multiclasse. Neste caso, a precisão média é calculada da seguinte forma:

$$\text{Precisão Média} = \frac{1}{3} (1.000 + 0.979 + 0.943) \approx 0.974$$

O modelo alcançou uma precisão de 97,4%, evidenciando sua aplicabilidade no contexto específico. Em seguida, o modelo foi salvo com sucesso no formato *JSON (JavaScript Object Notation)*, que armazena a estrutura e configuração da rede neural. Dessa forma, a rede neural pode ser integrada ao sistema projetado para interagir com os usuários, permitindo que carreguem imagens de exames de ressonância magnética e recebam resultados com base nas previsões geradas.

C. Rede Neural Convolutiva Integrada ao Sistema

A interface (Figura 9) foi projetada para permitir a realização e o armazenamento dos resultados. Essa interface possui as janelas necessárias para a interação tanto de um paciente quanto de um médico. Além disso, conta com as entidades do banco de dados correspondente para a correta gestão da informação.



Fig. 9. Página principal da interface gráfica.

A página web (Figura 10) foi projetada com um fluxo de trabalho simples e acessível, pensado para que qualquer usuário, independentemente do seu nível de experiência técnica, possa utilizá-la com facilidade. A interface é organizada de forma clara, com instruções passo a passo para guiar o usuário durante todo o processo. Desde o envio de imagens até a visualização dos resultados, cada ação é claramente indicada.

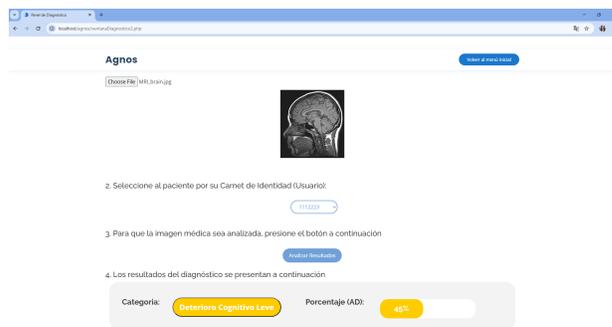


Fig. 10. Interface gráfica de diagnóstico

IV. CONCLUSÃO

Em conclusão, após o design e desenvolvimento do projeto, os objetivos estabelecidos foram alcançados. Os pontos mais relevantes incluem:

- O modelo funcionou de maneira eficaz, apresentando um desempenho positivo e uma capacidade destacada para identificar e classificar corretamente as imagens relacionadas à doença em estudo.
- Através do treinamento e avaliação do modelo, foi alcançada uma precisão consideravelmente alta, o que indica que a rede neural foi capaz de aprender padrões relevantes nos dados.
- Os resultados sugerem que o modelo tem um potencial significativo para ser implementado em cenários práticos de diagnóstico, atingindo um nível de confiabilidade adequado para seu uso na detecção precoce da doença, com um nível de precisão de 97,4%. Em contraste, pesquisas anteriores, como a de [5] e [13], relataram níveis de precisão mais baixos, em torno de 75%. Isso destaca o progresso alcançado na qualidade das previsões, ao incorporar redes neurais mais avançadas e utilizar um conjunto de dados de treinamento mais extenso.
- A seleção de parâmetros, como o otimizador e a função de perda, foi fundamental para otimizar o desempenho do modelo por meio de ajustes contínuos. Embora os resultados tenham sido satisfatórios, recomenda-se continuar investigando novas arquiteturas e métodos de otimização para melhorar a precisão, uma vez que a inteligência artificial e o aprendizado de máquina estão em constante evolução, oferecendo oportunidades para avanços adicionais. A matriz de confusão foi útil para avaliar o desempenho do modelo e ajustar sua precisão, identificando pontos fortes e fracos.
- A documentação detalhada do processo de treinamento e validação das redes neurais estabeleceu uma base sólida para projetos futuros.
- Recomenda-se complementar o uso das imagens de ressonância magnética com testes cognitivos adicionais, como questionários, testes neuropsicológicos ou jogos interativos. Esses testes permitiriam uma avaliação mais abrangente do estado cognitivo do paciente, sendo fundamentais para um diagnóstico mais preciso e personalizado de doenças como o Alzheimer.
- Por fim, o projeto desenvolvido representa uma ferramenta eficiente para o diagnóstico do Alzheimer, complementando os métodos tradicionais e oferecendo suporte valioso aos profissionais da saúde.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Romano, M. D. Nissen, N. Del Huerto e C. Parquet. “Enfermedad de Alzheimer”. Em: *Revista de Posgrado de la Vía Cátedra de Medicina* 75 (2007), pp. 9–12.
- [2] Alzheimer’s Association. “Alzheimer’s Disease Facts and Figures”. Em: *Alzheimer’s & Dementia* 18 (2022).
- [3] M. Aranda e A. Calabria. “Impacto económico-social de la enfermedad de Alzheimer”. Em: *Neurología Argentina* 11.1 (2019), pp. 19–26.
- [4] Red Latinoamericana de Gerontología. *Bolivia. Una ley instruye crear centros para ancianos con Alzheimer*. Consultado el 14 de marzo de 2025. 2009. URL: <https://www.gerontologia.org/portal/information/showInformation.php?idinfo=1583>.
- [5] A. Loddo, S. Buttau e C. Di Ruberto. “Deep learning based pipelines for Alzheimer’s disease diagnosis: a comparative study and a novel deep-ensemble method”. Em: *Computers in Biology and Medicine* 141 (2022), p. 105032. DOI: [10.1016/j.combiomed.2021.105032](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.105032).
- [6] J. Barrios. *Redes neuronales convolucionales*. Helath Big Data, 2022.
- [7] D. B. Keator et al. “Towards structured sharing of raw and derived neuroimaging data across existing resources”. Em: *NeuroImage* 124 (2017), pp. 1080–1084. DOI: [10.1016/j.neuroimage.2015.06.047](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.06.047).
- [8] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio e Aaron Courville. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. URL: <https://www.deeplearningbook.org/>.
- [9] Tom Mitchell. *Machine Learning*. McGraw-Hill, 1997.
- [10] P. Baldi, S. Brunak, Y. Chauvin, C. A. Andersen e H. Nielsen. “Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification: an overview”. Em: *Bioinformatics* 16.5 (2000), pp. 412–424.
- [11] F. Provost, T. Fawcett e R. Kohavi. “The case against accuracy estimation for comparing induction algorithms”. Em: *Proceedings of the 15th International Conference on Machine Learning*. 1998, pp. 445–453.
- [12] M. Sokolova, N. Japkowicz e S. Szpakowicz. “Beyond accuracy, F-score and ROC: a family of discriminant measures for performance evaluation”. Em: *AI 2009: Advances in Artificial Intelligence*. 2009, pp. 273–282.
- [13] Lisa Anita De Santi, Elena Pasini, Maria Filomena Santarelli, Daniele Genovesi e Vincenzo Positano. “An Explainable Convolutional Neural Network for the Early Diagnosis of Alzheimer’s Disease from 18F-FDG PET”. Em: *Journal of Digital Imaging* 36.1 (fev. de 2023), pp. 189–203. DOI: [10.1007/s10278-022-00685-7](https://doi.org/10.1007/s10278-022-00685-7), URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36344633/>.

AUTORES

Raquel Andrea Calderon Gallardo

Graduada em Engenharia Biomédica pela Universidad del Valle (Univalle), possui experiência em inteligência artificial e visão computacional, com aplicações na área da saúde. Atualmente, desenvolve projetos na área de neurociência e doenças neurodegenerativas. Também atua na divulgação científica e na



mentoria de jovens em STEM.

Maria Rene Ledezma Flores

Engenheira Biomédica pela Univalle - Universidad del Valle (2018), Mestrado em Engenharia Elétrica com ênfase em Biomecânica pela Udelar - Universidad de la República (2023). Atualmente, é professora em tempo integral de Engenharia Biomédica, com foco em pesquisa em biomecânica e ergonomia.



Avaliação dos níveis de estresse e ansiedade em estudantes de Engenharia Biomédica da Universidade Privada de Valle Cochabamba

Brayan Mejía, Sergio Vásquez, Marcelo Cruz, Melissa Herrera

Faculdade de Informática e Eletrônica – Univalle, Cochabamba - Bolívia

msb0031404@est.univalle.edu, vms0031149@est.univalle.edu, cgm0031216@est.univalle.edu,
htm0031168@est.univalle.edu

Abstract—This study aims to assess stress and anxiety levels among Biomedical Engineering students at Universidad Privada del Valle Cochabamba. Considering the academic rigor of the program, a survey was conducted with 50 students, addressing psychological, physiological, cognitive, and behavioral factors. The results revealed high rates of anxiety (70%), insomnia (50%), cognitive difficulties (60%), and behaviors such as procrastination (50%). Statistical analysis showed no significant differences regarding semester or housing conditions, suggesting that academic stress is widespread among students. Institutional strategies are recommended to support students' emotional well-being.

Index Terms—Academic Stress, Anxiety, Biomedical Engineering, Mental Health.

Resumo—Este estudo busca avaliar os níveis de estresse e ansiedade em estudantes de Engenharia Biomédica da Universidade Privada do Valle Cochabamba. Considerando o rigor acadêmico da carreira, foi realizado um levantamento com 50 alunos, abordando fatores psicológicos, fisiológicos, cognitivos e comportamentais. Os resultados revelaram altos índices de ansiedade (70%), insônia (50%), dificuldades cognitivas (60%) e comportamentos como procrastinação (50%). A análise estatística indicou que não houve diferença significativa relacionada ao semestre ou situação de moradia, demonstrando que o estresse acadêmico é generalizado entre os estudantes. Recomenda-se implementar estratégias institucionais para apoiar o bem-estar emocional dos alunos.

Palavras-chave— Ansiedade, Engenharia Biomédica, Estresse Acadêmico, Saúde Mental.

I. Introdução

Nos últimos anos, tem-se observado que a saúde mental dos estudantes universitários adquiriu crescente relevância no meio acadêmico, em razão de seu impacto significativo no desempenho acadêmico, na qualidade de vida e no bem-estar geral. Em particular, este estudo concentra-se nos alunos de Engenharia Biomédica, considerando o rigor da estrutura curricular, a carga de trabalho, a pressão por obter bons resultados e as altas expectativas profissionais. Tais demandas podem contribuir para o desenvolvimento de sintomas de depressão e ansiedade, afetando de forma negativa tanto a saúde mental quanto o desempenho acadêmico dos estudantes.

Diante do exposto, o presente trabalho busca avaliar o nível de depressão e ansiedade entre os estudantes, por meio de pesquisas aplicadas que identificam e analisam quatro parâmetros fundamentais: fatores psicológicos, fatores fisiológicos, fatores cognitivos e fatores comportamentais.

Cada um desses parâmetros fornece informações relevantes sobre os diversos aspectos que influenciam a saúde mental dos alunos, permitindo uma análise integral do problema.

Este estudo pretende contribuir para o entendimento dos principais fatores que afetam a saúde mental dos estudantes de Engenharia Biomédica, bem como para a identificação de áreas críticas que possam ser abordadas para melhorar seu bem-estar emocional e acadêmico. Ademais, espera-se que os resultados obtidos sirvam como ponto de partida para futuras investigações e para o desenvolvimento de estratégias de intervenção adequadas.

II. Materiais e métodos

De acordo com García et al. [1], o termo estresse tem sido utilizado ao longo da história para denominar diferentes percepções da realidade. O estresse costuma ser interpretado em referência a uma ampla gama de experiências, entre as quais se identificam o nervosismo, a tensão, o cansaço, a sobrecarga, a inquietação, entre outras sensações semelhantes. Da mesma forma, é atribuído a situações de medo, temor, angústia, pânico, necessidade de cumprimento, vazio existencial, incapacidade de enfrentamento ou incompetência.

Especificamente, o estresse acadêmico é definido como uma reação fisiológica, emocional, cognitiva e comportamental diante de estímulos e eventos acadêmicos [1]. Por um lado, é causa de que o estudante se sinta angustiado diante de problemas que lhe parecem difíceis de resolver, perdendo o controle necessário para solucioná-los [20].

Segundo Montevilla Castillo [17], uma das principais causas do estresse acadêmico na Bolívia manifesta-se em múltiplas tarefas simultâneas, prazos apertados e altos níveis de exigência institucional. Essa acumulação de responsabilidades gera uma pressão constante que impacta não apenas o bem-estar emocional dos estudantes, mas também seu desempenho acadêmico, pois pode levar a estados de desmotivação, bloqueio mental e até abandono parcial das atividades. Essas dinâmicas são agravadas por fatores estruturais como a falta de apoio docente e a escassa organização curricular, o que intensifica o sentimento de incapacidade e desgaste emocional. Tais experiências, quando prolongadas, contribuem para o desenvolvimento de estados ansiosos que afetam diretamente a concentração, a tomada de decisões e a autoconfiança no processo de aprendizagem. Isso compromete não apenas o rendimento

acadêmico, mas também a motivação, o desenvolvimento pessoal e as relações sociais.

Desde uma perspectiva neurobiológica, o estresse ativa o eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HHA), provocando a liberação de glicocorticoides como o cortisol. Quando essa ativação é prolongada, ocorrem alterações em estruturas cerebrais como o hipocampo, a amígdala e o córtex pré-frontal medial, afetando funções cognitivas essenciais como a memória, a concentração e a regulação emocional. Essas alterações são especialmente frequentes em contextos universitários exigentes, nos quais os estudantes estão submetidos a pressões contínuas [11].

Segundo Torres et al. [2], a ansiedade é o resultado de um transtorno neurótico geralmente ocasionado por experiências desagradáveis, manifestando-se por meio de alterações no estado de ânimo e fazendo com que o indivíduo experimente uma reação de alerta diante de situações de perigo que não têm fundamento real aparente, diferentemente do medo, que é uma reação de defesa diante de um perigo tangível e evidente. Caracteriza-se por apresentar manifestações constantes tanto somáticas quanto subjetivas. De acordo com Pitoni et al. [3], está associada a diversos fenômenos relacionados como medo, fobia, angústia ou estresse, o que gerou confusão e ambiguidade em seu significado. A ansiedade cumpre uma função biológica adaptativa por seu componente de antecipação frente a um perigo real ou objetivo, mas pode tornar-se desadaptativa quando é ativada diante de estímulos de um perigo irreal. A ansiedade também é considerada um estado emocional desagradável, vinculado a pensamentos negativos, que envolve a avaliação cognitiva que o indivíduo faz da situação percebida como ameaçadora [18].

Nessa linha, a teoria do enfrentamento desenvolvida por Lazarus e Folkman propõe que o estresse ocorre quando as demandas do ambiente excedem os recursos pessoais disponíveis, enquanto a ansiedade está relacionada à antecipação de ameaças, muitas vezes sem uma base objetiva [12]. Embora ambos os conceitos estejam entrelaçados, sua origem e dinâmica são distintas, e sua diferenciação é fundamental para compreender o impacto dos processos psicológicos no contexto educacional.

Em consonância com o descrito anteriormente, as manifestações de ansiedade podem ser geradas por estímulos e contextos variados, sendo particularmente comuns aqueles cenários em que o sujeito está exposto à avaliação social, como ocorre no âmbito educacional [4]. A ansiedade diante de provas está condicionada pela cognição individual, personalidade e outros fatores, e tem efeitos negativos sobre os níveis acadêmicos e a saúde mental dos estudantes [5]. No contexto da avaliação, fala-se de um ciclo de ansiedade antecipatória que começa com um medo primário da avaliação negativa do eu social por parte dos outros, e um medo secundário das consequências dos sintomas do medo. Em outras palavras, a pessoa sente-se ansiosa antes mesmo de ser avaliada [19].

O estresse acadêmico é um fator estressor importante na vida universitária, que deriva do sofrimento psicológico subjetivo em diversos aspectos da aprendizagem acadêmica. Tem um impacto negativo sobre a saúde mental, assim como na

capacidade de concluir os estudos de forma eficaz [5]. Diversos estudos evidenciaram uma correlação entre estresse acadêmico e ansiedade [6, 7].

Nesse sentido, diversas pesquisas recentes destacaram o papel protetor da inteligência emocional frente ao estresse e à ansiedade em estudantes universitários. Estudantes com maior clareza emocional e capacidade de autorregulação apresentam menores níveis de ansiedade diante de exames, menor risco de depressão e burnout, e melhor adaptação ao ambiente acadêmico [13, 14]. Da mesma forma, outros autores assinalaram que essa capacidade emocional melhora o enfrentamento e o bem-estar subjetivo, contribuindo de forma significativa para o desempenho acadêmico [15].

De acordo com Bentley et al. [8], a ansiedade prolongada diante de exames acadêmicos tem consequências adversas para o corpo, como distúrbios do sono, depressão, choro e distúrbios alimentares. Em alguns casos, pode até provocar automutilação e ideação suicida. No entanto, além do impacto psicológico, foi documentado que o estresse sustentado também pode gerar efeitos físicos graves. A ativação crônica do sistema nervoso simpático estimula a produção contínua de catecolaminas, como a adrenalina, que afetam diretamente o sistema cardiovascular. Foram registrados casos de hipertensão, cefaleias, distúrbios digestivos, fadiga crônica e até risco de arritmias cardíacas em estudantes expostos a contextos acadêmicos altamente exigentes [16].

Atualmente, presta-se cada vez mais atenção à eficácia do tratamento de diferentes transtornos psicológicos. Estão disponíveis diversos procedimentos de intervenção cognitivo-comportamentais bem estabelecidos para tratar quase todos os transtornos de ansiedade [9].

É de suma importância atentar para as diferentes experiências que geram estresse e ansiedade. Em termos gerais, estão relacionados, mas são distintos. A ansiedade normal é menos acentuada, mais leve e não implica uma redução da liberdade pessoal; por outro lado, a ansiedade patológica é desproporcional à situação ou se apresenta na ausência de perigo iminente. No entanto, o estresse quase sempre atua como um desencadeador [10].

III. Resultados e Análise Estatística

Foram analisados os dados de 50 alunos, cuja distribuição por semestre e situação de moradia permitiu identificar a predominância de alunos que vivem com a família (aproximadamente 80% da amostra) e uma representatividade menor de alunos que vivem sozinhos. A análise dos fatores relacionados ao estresse acadêmico foi realizada com base em uma escala Likert (0 = Nunca; 4 = Sempre) e agrupou os itens em quatro categorias: **psicológicos, fisiológicos, cognitivos e comportamentais**.

A Análise dos Fatores

a.1) Fatores Psicológicos:

Os resultados indicam que os alunos apresentam altos níveis de ansiedade, preocupação e desânimo em relação ao desempenho acadêmico. Observou-se que aproximadamente 70% dos estudantes relataram sentir ansiedade de forma frequente ou sempre. Essa elevada incidência sugere que a

resposta emocional ao estresse está fortemente associada às demandas acadêmicas, refletindo um estado de tensão que pode comprometer a motivação e o bem-estar.

TABELA I
Distribuição das Respostas para os Fatores Psicológicos

ITEM	NUNCA (%)	RARA VEZ (%)	ÀS VEZES (%)	FREQUENTE (%)	SEMPRE (%)
Ansiedade quanto ao desempenho acadêmico	2	8	20	40	30
Desânimo / Sensação de sobrecarga	4	10	30	36	20
Irritabilidade ou mudanças de humor	6	14	28	36	16
Nervosismo ou inquietude	3	12	25	40	20

Esta tabela apresenta a distribuição percentual das respostas dos alunos em relação aos principais itens avaliados no âmbito dos fatores psicológicos.

Observação: Outras tabelas e gráficos complementares (referentes aos fatores fisiológicos, cognitivos e comportamentais, bem como as comparações estatísticas) estão disponíveis nos anexos deste artigo.

a.2) Fatores Fisiológicos:

Os sintomas físicos decorrentes do estresse também se destacam. A prevalência de insônia é elevada, com cerca de 50% dos alunos relatando dificuldades para dormir de forma frequente ou sempre. Além disso, sintomas como tensão muscular, problemas digestivos e palpitações aparecem em níveis significativos, o que pode acarretar fadiga crônica e afetar a capacidade de concentração e o rendimento nas atividades diárias.

TABELA II
Distribuição das Respostas para os Fatores Fisiológicos

ITEM	NUNCA (%)	RARA VEZ (%)	ÀS VEZES (%)	FREQUENTE (%)	SEMPRE (%)
Insônia / Dificuldades para dormir	10	15	25	35	15
Tensão muscular	8	12	30	40	10
Problemas digestivos	20	18	25	30	7
Palpitações / Taquicardia	15	20	30	25	10

a.3) Fatores Cognitivos:

No âmbito cognitivo, os alunos demonstraram dificuldades para concentrar-se e uma tendência marcante a antecipar resultados negativos. Mais de 60% relataram frequentemente a presença de pensamentos intrusivos e dificuldades em relaxar, o que indica que a pressão acadêmica interfere no

processamento mental e na tomada de decisões, criando um ciclo de pensamentos catastróficos que agrava o estresse.

TABELA III
Distribuição das Respostas para os Fatores Cognitivos

ITEM	NUNCA (%)	RARA VEZ (%)	ÀS VEZES (%)	FREQUENTE (%)	SEMPRE (%)
Dificuldade para concentrar-se	12	18	30	28	12
Pensamentos intrusivos	10	20	30	25	15
Antecipação de resultados negativos	5	15	35	30	15
Dificuldade para relaxar	8	20	32	25	15

a.4) Fatores Comportamentais:

Quanto aos comportamentos, a procrastinação e o isolamento social se mostram como estratégias de enfrentamento comuns. Aproximadamente 50% dos alunos confessaram adotar a procrastinação de forma frequente, comportamento que, embora possa temporariamente aliviar a ansiedade, tende a acumular tarefas e aumentar a pressão posteriormente. Alterações nos hábitos alimentares, como comer em excesso ou perder o apetite, também foram relatadas com frequência, enquanto o uso de substâncias (como café, álcool ou tabaco) foi menos prevalente, mas ainda presente em uma parcela dos alunos.

TABELA IV
Distribuição das Respostas para os Fatores Comportamentais

ITEM	NUNCA (%)	RARA VEZ (%)	ÀS VEZES (%)	FREQUENTE (%)	SEMPRE (%)
Procrastinação	20	15	20	30	15
Isolamento social	18	12	25	30	15
Alterações nos hábitos alimentares	16	14	30	30	10
Uso de substâncias	40	20	20	15	5

a.5) Comparações por Semestre e Situação de Moradia

A análise comparativa realizada entre os diferentes semestres revelou que, embora os alunos dos primeiros semestres apresentem níveis ligeiramente superiores de insônia e desânimo, e os alunos dos semestres avançados mostrem maiores dificuldades cognitivas e comportamentais, essas diferenças não atingiram significância estatística. Da mesma forma, ao comparar a situação de moradia, observou-se que os alunos que vivem com a família apresentam, em média, pontuações um pouco maiores em todos os fatores, principalmente em procrastinação e alterações alimentares; contudo, essas diferenças também não se mostraram estatisticamente significativas, evidenciando que o estresse

acadêmico é um fenômeno generalizado independentemente do ambiente residencial.

Além disso, a análise de correlação revelou uma forte relação entre as pontuações globais de estresse e ansiedade ($r \approx 0,80$, $p < 0,001$). Essa alta correlação demonstra que os alunos que apresentam níveis elevados de estresse tendem, invariavelmente, a manifestar altos níveis de ansiedade, evidenciando a inter-relação entre as dimensões emocional e física do estresse.

TABELA V
Distribuição dos Alunos por Semestre e Situação de Moradia

SEMESTRE	VIVE COM A FAMÍLIA	VIVE SOZINHO	TOTAL
1°	12	3	15
2°	8	2	10
3°	5	3	8
4°	4	1	5
5°	6	4	10
6°	5	0	5
Total	40	10	50

Esta tabela resume a amostra e permite visualizar a predominância de alunos que vivem com a família e a distribuição dos semestres.

TABELA VI
Comparação dos Médias dos Fatores por Situação de Moradia

FATOR/VARIÁVEL	VIVE COM A FAMÍLIA (MÉDIA ± DP)	VIVE SOZINHO (MÉDIA ± DP)	P-VALOR
Psicológicos	2,55 ± 0,50	2,40 ± 0,60	0,15
Fisiológicos	2,60 ± 0,60	2,45 ± 0,70	0,20
Cognitivos	2,35 ± 0,50	2,20 ± 0,55	0,18
Comportamentais	2,70 ± 0,60	2,50 ± 0,65	0,12

Conclusão

Os resultados indicam que o estresse acadêmico em estudantes de Engenharia Biomédica da Univalle sede Cochabamba se manifesta de forma sistêmica, com 70 % relatando ansiedade frequente (dimensão psicológica), 50 % referindo insônia ou tensão muscular (dimensão fisiológica), 60 % apresentando dificuldade de concentração (dimensão cognitiva) e 50 % admitindo procrastinação regular (dimensão comportamental), independentemente de variáveis como semestre cursado ou moradia ($p = 0,95$) e estando fortemente associado à ansiedade ($r = 0,80$; $p < 0,001$). Esse panorama revela não apenas a necessidade de reconhecer o estresse como um desafio intrínseco ao currículo, mas também de implementar prontamente um conjunto de ações coordenadas — como apoio psicológico contínuo, oficinas de gestão de tempo e de aprendizagem ativa, pausas programadas com práticas de mindfulness e formação de docentes para identificação precoce de sinais de sobrecarga — que visem à promoção da resiliência e ao fortalecimento do desempenho acadêmico. A adoção dessas medidas servirá de base para futuras investigações longitudinais e multicêntricas, possibilitando o desenvolvimento de protocolos personalizados e de políticas institucionais eficazes na promoção da saúde mental no ensino superior.

REFERÊNCIAS

[1] García, N. B., & Zea, R. M. (2011). Estrés

acadêmico. *Revista de psicología Universidad de Antioquia*, 3(2), 55-82.

[2] Torres Camacho, V., & Chávez Mamani, A. A. (2013). Ansiedad. *Revista de Actualización Clínica DAM Investiga*, 35, 1788.

[3] Pitoni, D., & Rovella, A. (2013). Ansiedad y perfeccionismo: su relación con la evaluación académica universitaria. *Enseñanza e investigación en Psicología*, 18(2), 329-341.

[4] Toscano, J. H. Á., Rivaldo, L. I. R., & Delgado, L. V. (2018). Ansiedad ante la evaluación académica y engagement: revisión conceptual, perspectivas, evidencias y líneas de discusión. In *Estudios del desarrollo humano y socioambiental* (pp. 208-235). Corporación Universitaria Reformada.

[5] Zheng, G., Zhang, Q., & Ran, G. (2023). The association between academic stress and test anxiety in college students: The mediating role of regulatory emotional self-efficacy and the moderating role of parental expectations. *Frontiers in Psychology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1008679>.

[6] Bhat, R. H. (2017). Inteligencia emocional de los adolescentes en relación con su ansiedad ante los exámenes y el estrés académico. *Rehabilitación* 2, 21–25. doi: 10.11648/j.rs.20170201.15

[7] Trigueros, R., Padilla, A. M., Aguilar-Parra, J. M., Rocamora, P., Morales-Gázquez, M. J., y López-Liria, R. (2020). La influencia de la inteligencia emocional en la resiliencia, la ansiedad ante los exámenes, el estrés académico y la dieta mediterránea. Un estudio con estudiantes universitarios. *Int. J. Medio Ambiente. Res. Salud Pública* 17:2071. doi: 10.3390/ijerph17062071

[8] Bentley, H., O'Hagan, O., Raff, A., y Bhatti, I. (2016). ¿Qué tan seguros están nuestros hijos? La visión más completa de la protección de la infancia en el Reino Unido. Londres, Reino Unido: NSPCC.

[9] Caballo, V., & Mateos, P. (2000). El tratamiento de los trastornos de ansiedad a las puertas del siglo XXI. *Psicología Conductual*, 8(2), 173-215.

[10] Reyes-Ticas, J. A. (2010). Trastornos de ansiedad: Guía práctica para diagnóstico y tratamiento. Biblioteca virtual en salud, 1-34.

[11] Rodríguez-Fernández, J. M., García-Acero, M., & Franco, P. (2012). Neurobiología del estrés agudo y crónico: Su efecto en el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal y la memoria. *Revista Ecuatoriana de Neurología*, 21(1-3), 78-90.

[12] Lazarus, R. y Folkman, S. (1986): Estrés y procesos cognitivos. Barcelona: Ediciones Martínez Roca

[13] La inteligencia emocional y su efecto protector ante la ansiedad, depresión y el estrés académico en estudiantes universitarios. (2020). TZHOECOEN, 12(4), 449-461. <https://doi.org/10.26495/tzh.v12i4.1395>.

[14] Gómez-Romero, M. J., Limonero, J. T., Trallero, J. T., Montes-Hidalgo, J., & Tomás-Sábado, J. (2017). Relación entre inteligencia emocional, afecto negativo y riesgo suicida en jóvenes universitarios. *Ansiedad y Estrés*, 24(1), 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.anyes.2017.10.007>.

[15] Psico-smart.com. (s. f.). La influencia de la inteligencia emocional en los resultados de las pruebas de aptitud. <https://psico-smart.com/articulos/articulo-la-influencia-de-la-inteligencia-emocional-en-los-resultados-de-las-pruebas-de-aptitud-177854>

[16] Maceo Palacio, O., Maceo Palacio, A., Varón Blanco, Y., Maceo Palacio, M., & Peralta Roblejo, Y. (2016). Estrés académico: causas y consecuencias. *MULTIMED*, 17(2). <https://revmultimed.sld.cu/index.php/mtm/article/view/302/410>.

[17] Castillo, I. M. (2024). Impacto del Estrés Académico en el Rendimiento Estudiantil, un Estudio Descriptivo-Correlacional en Bolivia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 5055-5070. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13949.

[18] Barrios Quiroz, M. S. (2017). Ansiedad escolar en adolescentes de secundaria (Master's thesis, Sucre: Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Central Sucre). <http://bibliotecas.uasb.edu.bo:8080/handle/20.500.14624/811>

[19] Parada, B. E., & Schulmeyer, M. K. (2021). Procrastinación académica en estudiantes universitarios. *Aportes*, 1(30). <https://ojs.upsa.edu.bo/index.php/aportes/article/download/17/17>

[20] Llanque, L., & Ch, A. M. (2020). Estrés académico en estudiantes de la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. *Bio Scientia*, 3(5), 24-36. <https://revistas.usfx.bo/index.php/bs/article/view/270>

AUTORES



Brayan Javier Mejía Saavedra é estudante do último ano de Engenharia Biomédica na Universidade Privada del Valle, sede Cochabamba, Bolívia, ingressando na universidade em 2022, onde também atua como pesquisador. É CEO e fundador da startup DocIA,

um projeto de telemedicina que integra kits IoT de sinais vitais, inteligência artificial, históricos clínicos digitais e oferece o primeiro contato médico. Integra a Sociedade Científica de Estudantes de Engenharia Biomédica (SCEIB), exercendo o cargo de Secretário-Geral na Mesa Diretiva. Possui interesse em projetos que melhorem a qualidade de vida e a saúde das pessoas. Em 2024/2, participou de um intercâmbio pelo programa MARCA MERCOSUL na Universidade Estadual Paulista (UNESP), no Brasil, integrando a iniciativa Crea Joven SP.



Sergio Antonio Vásquez Martínez é estudante do último ano de Engenharia Biomédica na Universidade Privada del Valle (Univalle), sede Cochabamba, Bolívia, ingressando na universidade em 2022, onde também atua como pesquisador. Integra a Sociedade Científica de Estudantes de Engenharia Biomédica (SCEIB). É cofundador da startup DocIA, um projeto de telemedicina que integra kits IoT de sinais vitais, inteligência artificial, utiliza históricos clínicos digitais e oferece o primeiro contato médico. Seu interesse está voltado especialmente para projetos que busquem melhorar a qualidade de vida e o bem-estar através da aplicação da Engenharia Biomédica. Além disso, participa ativamente em pesquisas relacionadas à sua área de formação, explorando soluções tecnológicas que promovam avanços em saúde e bem-estar.



Marcelo Fabian Cruz Guizada é um estudante do último ano de Engenharia Biomédica na Universidade Privada del Valle (Univalle), localizada em Cochabamba, Bolívia, onde se matriculou em 2022. Ele também trabalha como pesquisador lá. É membro da Sociedade Científica de Estudantes de Engenharia Biomédica (SCEIB) e faz parte da sociedade de estudantes líderes da UNIVALLE (SOE). Seus interesses estão focados em pesquisar novas tecnologias para melhorar a qualidade de vida das pessoas e ajudar combinando conhecimentos de engenharia, tecnologia e medicina.



Melissa Andrea Herrera Tambo é uma estudante do último ano de Engenharia Biomédica na Universidade Privada del Valle (Univalle), localizada em Cochabamba, Bolívia, onde se matriculou em 2022. Também atua como pesquisadora na mesma instituição. É membro da Sociedade Científica de Estudantes de Engenharia Biomédica (SCEIB) e faz parte da Sociedade de Estudantes Líderes da UNIVALLE (SOE). Seus interesses estão voltados ao desenvolvimento e aplicação de soluções biomédicas inovadoras que promovam o bem-estar e a saúde das pessoas por meio da integração entre engenharia, tecnologia e ciências médicas.

Estudo para Desenvolvimento de um Robô de Combate para a Categoria Beetleweight - 1,36kg (31b)

Alexandre B. Lugli; Eugênio M. J. da Silva; Egídio R. Neto; Gabriel de S. Pivoto; Julia B. Alves; Wanderson E. Saldanha
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
baratella@inatel.br; egidioneto@inatel.br; eugenio@inatel.br; gabriel.pivoto@ges.inatel.br; julia.botrovas@gep.inatel.br; wsaldanha@inatel.br

Abstract—Robotics competitions are becoming more and more widespread across the country. Thus, this paper describes the development and study of robots applied in the combat categories team of the Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), RobotBulls. The information presented involves electronics, mechanical design and firmware, with the aim of applying concepts studied about the control system for robots applied to combat.

Index Terms— Antweight, Beetleweight, Combat, design, Fairyweight, robotics.

Resumo—As competições de robótica estão se tornando cada vez mais abrangentes em todo o país. Assim, este trabalho descreve o estudo de robôs aplicados nas categorias de combate da equipe de robótica do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), RobotBulls. As informações apresentadas envolvem eletrônica, projeto mecânico e firmware, com o objetivo de aplicar conceitos estudados acerca do sistema de controle para os robôs aplicados a combate.

Palavras chave—Antweight, Beetleweight, Combate, Fairyweight, projeto, robótica.

I. INTRODUÇÃO

A RobotBulls é o time de Robótica e Inteligência Artificial do INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações), atuando no desenvolvimento de soluções tecnológicas e sistemas robóticos inovadores [1]. A equipe está sediada em um laboratório próprio [2], equipado com infraestrutura específica que oferece condições ideais para experimentação, prototipagem e testes, promovendo um ambiente propício à pesquisa aplicada.

Composta majoritariamente por alunos de Engenharia do INATEL, a RobotBulls conta com o suporte de professores orientadores que acompanham e impulsionam os projetos em desenvolvimento. Além disso, o grupo recebe periodicamente estudantes estrangeiros por meio de programas de intercâmbio, enriquecendo a diversidade de ideias e promovendo o intercâmbio de experiências técnico-científicas.

A Figura 1 mostra a equipe RobotBulls na Iron Cup de 2024.

A Figura 2 mostra o laboratório da Robotbulls.

Atualmente, a Robotbulls atua em 16 categorias diferentes, como Robô *Trekking*, *Drone*, Combate (*Fairyweight*, *Antweight* e *Beetleweight*), Mini Sumo (autônomo e rádio controlado), Sumo 3kg (autônomo e rádio controlado), Futebol de Robôs,



Fig. 1. Equipe RobotBulls [1]

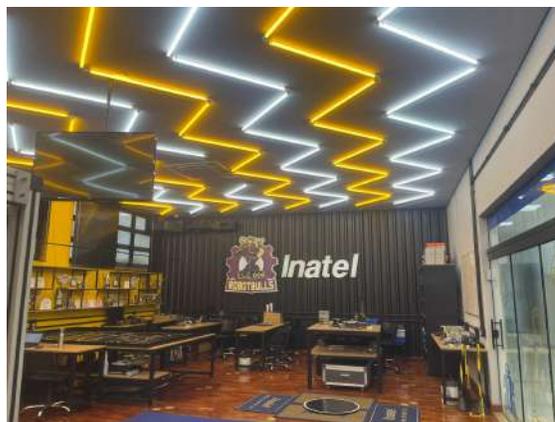


Fig. 2. Laboratório da RobotBulls [2]

Futebol Virtual 2D, Seguidor de Linha, Perseguidor de Linha e Lego Sumo. A equipe alcançou reconhecimento nacional e internacional e já participou de competições no Peru, Colômbia e Japão. No Brasil, eventos de destaque são o RCX (*Robocore Experience*) [3] e a IronCup (*Inatel Robotics National Cup*) [4], sendo este último uma das maiores competições de robótica do país, que acontece anualmente em Santa Rita do Sapucaí.

A Figura 3 ilustra a equipe na RCX em 2024.

A Figura 4 ilustra a Iron Cup em 2024.

Essas competições são fundamentais na formação de acadêmicos, promovendo o conceito de aplicação prática em paralelo à teoria. A seção de robôs de combate destaca-se



Fig. 3. RCX 2024 [3]



Fig. 4. Iron Cup [4]

como uma das mais populares, onde máquinas se enfrentam em arenas seguindo regras previamente definidas, lembrando a dinâmica de combates organizados. Além do aspecto competitivo, essas apresentações contribuem para o aprendizado e a inovação, desafiando os participantes a desenvolver projetos criativos e tecnologicamente avançados. Os robôs são avaliados por critérios como resistência, estratégias de ataque e defesa, enquanto as equipes vencedoras se destacam pelo alto nível técnico e pela capacidade de inovação.

Este artigo tem como objetivo apresentar o estudo e desenvolvimento de um robô de combate para a categoria Beetleweight — com peso máximo de 1,36 kg (3 lb). O projeto contempla a concepção de um robô equipado com uma arma ativa, projetado para operar por controle remoto. Conforme as regras vigentes das principais competições nacionais e internacionais, os competidores têm liberdade para definir o formato e as dimensões do robô, desde que respeitados os limites estabelecidos pela categoria.

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte ma-

neira: o Capítulo I apresenta a introdução e o contexto do projeto; o Capítulo II aborda a fundamentação teórica e o processo de desenvolvimento do robô; o Capítulo III descreve os testes realizados e os resultados obtidos; e o Capítulo IV apresenta as considerações finais, dificuldades enfrentadas e sugestões para trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta os principais conceitos e definições relacionados ao desenvolvimento deste trabalho.

A. Regras

A categoria *Beetleweight* é uma das mais populares nas competições de robôs de combate, sendo regida por um conjunto de regras específicas que garantem segurança e equilíbrio entre os competidores. O principal requisito é que o peso máximo do robô não ultrapasse 1,36 kg (3 libras), incluindo todos os componentes, como armas, baterias e sistemas de controle. Em relação às dimensões e ao formato, não há restrições, permitindo liberdade criativa para os competidores, desde que todas as partes estejam bem fixadas e não representem risco de desprendimento durante os combates. [5]

A Figura 5 ilustra um exemplo de robô desenvolvido para categoria Beetleweight.



Fig. 5. Robô da categoria Beetleweight [5]

Os robôs da categoria *Beetleweight* devem ser rádio-controlados, ou seja, operados por seus pilotos por meio de um controle remoto. É essencial que o sistema de controle utilizado evite interferências com outros competidores, sendo necessário verificar previamente os canais ou frequências com os organizadores do evento. Além disso, os robôs podem ser equipados com armas ativas ou passivas, que desempenham papéis diferentes durante as lutas. Armas ativas, como discos rotativos, martelos ou lâminas, têm movimento próprio e são projetadas para causar impacto ou dano no adversário. Já as armas passivas incluem estruturas defensivas ou empurradores, que não possuem movimento ativo. Armas que utilizam fogo são permitidas na categoria, desde que sigam regulamentações específicas para garantir a segurança da arena e dos participantes.

Os combates acontecem em arenas protegidas por barreiras de segurança transparentes, projetadas para evitar que partes ou fragmentos dos robôs atinjam os espectadores. Algumas arenas podem conter obstáculos ou elementos adicionais que aumentam a complexidade da batalha. As lutas têm duração média de 2 a 3 minutos, dependendo das regras do torneio.

Caso nenhum robô seja imobilizado ou destruído até o final do tempo regulamentar, a decisão sobre o vencedor é tomada pelos juízes com base em critérios como dano causado, controle do robô e agressividade durante o combate.

A vitória em um combate da categoria *Beetleweight* pode ser alcançada de diferentes maneiras. Um robô pode vencer ao imobilizar o adversário por mais de 10 segundos, ao empurrá-lo para fora da arena (quando permitido pelas regras) ou ao ser declarado vencedor pelos juízes ao final do tempo regulamentar.

Antes de cada combate, todos os robôs passam por inspeções de segurança obrigatórias para garantir que estão em conformidade com as regras e que não apresentam riscos aos participantes. Sistemas de desligamento de emergência também são exigidos, assegurando a proteção dos operadores durante a manipulação dos robôs fora da arena. Essas normas reforçam o compromisso das competições em promover disputas seguras, justas e empolgantes, incentivando a criatividade e o avanço tecnológico dos participantes.

B. Mecânica

A mecânica de um robô de combate da categoria *Beetleweight* é cuidadosamente projetada para equilibrar resistência, eficiência e peso. A estrutura, um dos elementos mais importantes, é frequentemente construída com materiais como alumínio e TPU (poliuretano termoplástico). O alumínio é amplamente utilizado devido à sua leveza e resistência, sendo ideal para áreas que exigem proteção contra impactos diretos. Já o TPU, um material flexível e durável, é empregado em componentes que necessitam de maior elasticidade para absorver choques e minimizar danos estruturais. Essa combinação de materiais garante que o robô tenha uma base sólida e ao mesmo tempo flexível, capaz de suportar os rigores do combate.

As armas, que representam o principal elemento ofensivo do robô, geralmente são fabricadas em aço de alta resistência. Esse material é escolhido por sua dureza e capacidade de causar danos significativos aos oponentes, seja por meio de impacto, corte ou perfuração. Armas rotativas, como discos ou lâminas, requerem precisão no design e um sistema de montagem robusto para maximizar sua eficiência e evitar falhas durante os combates. O aço também oferece durabilidade, permitindo que o robô resista aos impactos repetidos nas lutas sem comprometer o desempenho.

As rodas, responsáveis pela movimentação do robô, são normalmente feitas de PU (poliuretano). Esse material combina aderência e resistência ao desgaste, garantindo tração adequada na arena e contribuindo para manobras rápidas e precisas. Rodas de PU são projetadas para suportar o peso do robô e os impactos das batalhas, enquanto mantêm o controle sobre superfícies diversas. A escolha cuidadosa do diâmetro e do padrão das rodas influencia diretamente a mobilidade e a estratégia de combate, permitindo que o robô se posicione rapidamente para atacar ou se defender.

Essa integração de diferentes materiais – alumínio, TPU, aço e PU – reflete o cuidado técnico envolvido na construção de um robô *Beetleweight*. Cada componente é projetado para trabalhar em harmonia, garantindo que o robô seja leve, ágil

e resistente, características essenciais para alcançar o sucesso nas arenas de combate.

C. Eletrônica

O desenvolvimento da eletrônica para robôs de combate na categoria *Beetleweight* demanda uma abordagem técnica que priorize eficiência, leveza e confiabilidade. A escolha dos componentes eletrônicos deve ser cuidadosamente planejada para atender às exigências das competições, considerando aspectos como potência, controle de locomoção, operação das armas e segurança. Cada elemento deve garantir o máximo desempenho dentro dos limites de peso e espaço permitidos.

As baterias utilizadas em robôs dessa categoria geralmente variam entre 4S e 6S, o que significa que possuem tensões de 14,8 V a 22,2 V, dependendo da estratégia e do design do robô. Essas baterias, geralmente de íon-lítio ou polímero de lítio (LiPo), oferecem alta densidade energética, permitindo fornecer energia suficiente para motores, armas e outros sistemas durante combates intensos. Para gerenciar a energia com precisão, utilizam-se controladores eletrônicos de velocidade (ESCs) específicos para locomoção e armas. Os ESCs de locomoção garantem a resposta ágil e o controle preciso dos motores de tração, enquanto os ESCs das armas asseguram o acionamento rápido e eficiente dos sistemas ofensivos, como discos ou martelos rotativos.

Além disso, o sistema de controle remoto é projetado para proporcionar alta precisão nos comandos, integrando tecnologias que minimizam interferências e aumentam a confiabilidade da comunicação. Esses sistemas garantem que o piloto tenha controle total sobre a movimentação e as ações do robô durante a competição.

No que diz respeito à segurança, o robô é equipado com uma chave geral que permite desligar rapidamente todos os sistemas em caso de necessidade, prevenindo acidentes durante ajustes ou manutenção. Um LED indicador também é adicionado para informar o estado de operação do robô, sinalizando se ele está ligado.

Por fim, o layout interno dos componentes eletrônicos é planejado para otimizar o espaço e facilitar a manutenção. O posicionamento estratégico dos elementos, como baterias, ESCs, chave geral e receptores, contribui para o equilíbrio do robô e melhora sua durabilidade em combate. Esses detalhes garantem que o robô esteja não apenas funcional, mas também competitivo e seguro nas arenas de combate.

D. Firmware

O sistema de controle é um elemento essencial no desempenho de robôs de combate, possibilitando que o piloto realize manobras precisas, acione armas e adapte estratégias durante as competições. Esse sistema precisa ser altamente confiável e responsivo, além de resistente a interferências eletromagnéticas, comuns em arenas com múltiplos robôs operando simultaneamente.

A comunicação entre o piloto e o robô é estabelecida por meio de um transmissor e um receptor. O transmissor, equipado com joysticks, botões e interruptores configuráveis, é usado para enviar os comandos. Já o receptor, instalado no

robô, recebe esses sinais e os transmite para os controladores eletrônicos ou diretamente para o firmware.

Os controladores eletrônicos de velocidade (ESCs) desempenham um papel crítico nesse sistema. Eles recebem os sinais do receptor e regulam a potência fornecida aos motores, controlando a velocidade, a direção de locomoção e o acionamento das armas. Os ESCs podem ser configurados para otimizar o desempenho do robô, ajustando parâmetros como frenagem e rampas de aceleração, de acordo com a estratégia desejada.

Existem dois principais métodos de controle utilizados em robôs de combate: o controle de tanque e o controle diferencial. O controle de tanque, em que cada joystick comanda um lado do robô, é mais simples e fácil de implementar, sendo ideal para iniciantes. Já o controle diferencial mistura os sinais dos joysticks para proporcionar movimentos mais fluidos e precisos, sendo preferido por pilotos experientes em competições de alto nível.

Além da funcionalidade básica, o sistema de controle também inclui medidas de segurança, como o failsafe, que desliga o robô automaticamente caso a comunicação com o transmissor seja interrompida. Sistemas de rádio modernos são projetados para operar de forma confiável em ambientes com alta interferência, enquanto fontes de alimentação isoladas garantem energia estável para os componentes de controle, mesmo em condições extremas.

Os avanços recentes nos sistemas de controle trouxeram funcionalidades adicionais, como telemetria em tempo real, conectividade com aplicativos móveis e telas LCD nos transmissores. Esses recursos permitem ao piloto monitorar parâmetros como o nível da bateria e a temperatura dos motores, além de ajustar configurações rapidamente durante as competições. Assim, o sistema de controle não apenas contribui para a eficiência operacional do robô, mas também oferece uma vantagem estratégica significativa nas arenas de combate.

III. CONCLUSÃO

A construção de um robô de combate na categoria Beetleweight é um processo que exige a integração cuidadosa de conhecimentos em mecânica, eletrônica e controle, além de uma abordagem estratégica para maximizar o desempenho nas arenas. Desde a seleção de materiais leves e resistentes, como alumínio, TPU e aço, até o desenvolvimento de sistemas eletrônicos avançados e confiáveis, cada decisão de projeto impacta diretamente no resultado final.

O uso de baterias de alta densidade energética, ESCs específicos para locomoção e armas, e um sistema de controle remoto de alta precisão são elementos cruciais para garantir a competitividade do robô. Além disso, a importância do firmware, que orquestra a interação entre os diversos subsistemas, e a otimização do layout interno reforçam a necessidade de um design funcional e eficiente.

A experiência adquirida durante o desenvolvimento e operação do robô proporciona aos participantes um aprendizado prático em áreas fundamentais, como programação, design mecânico, eletrônica aplicada e resolução de problemas em tempo real. Essas competências não apenas contribuem para o sucesso em competições, mas também oferecem uma base sólida para aplicações futuras em engenharia e tecnologia.

Por fim, este estudo demonstra que o desenvolvimento de robôs de combate vai além da competição. Ele promove inovação, trabalho em equipe e uma cultura de melhoria contínua, essenciais para o avanço tecnológico.

REFERÊNCIAS

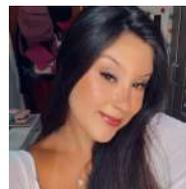
- [1] C. Roberts e T. Jones. *Engineering in Competitive Robotics*. 1st. Springer, 2020. ISBN: 9783030358371. DOI: [10.1007/978-3-030-35838-8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35838-8).
- [2] A. J. Martins e P. R. Souza. “Controle de Sistemas de Locomoção em Robótica Móvel”. Em: *Revista Brasileira de Robótica* 12.3 (2021), pp. 45–67. ISSN: 2237-8574. DOI: [10.1590/RBR2021.12.3.045](https://doi.org/10.1590/RBR2021.12.3.045).
- [3] RoboCore. *Regulamento Oficial de Robôs de Combate – Categoria Beetleweight*. 2024. URL: <https://www.robocore.net/regras> (acesso em 05/12/2024).
- [4] IronCup. *Manual Técnico da Competição*. 2023. URL: <https://www.ironcup.org/manual-tecnico> (acesso em 05/12/2024).
- [5] Turnigy. *Manual de Baterias LiPo*. 2022. URL: <https://www.turnigy.com/lipo-manual> (acesso em 05/12/2024).
- [6] Marco Antonio Meggiolaro et al. *Tutorial em Robôs de Combate*. 1.0. RioBotz PUC-Rio, ago. de 2006. URL: <http://www.riobotz.com.br> (acesso em 05/12/2024).

AUTORES

Gabriel de Souza Pivoto é graduando em Engenharia de Software pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações, é bolsista de IC sobre o estudo de categorias de robôs na equipe de robótica do INATEL, a RobotBulls.



Julia Botrovas é graduanda em Engenharia de Produção pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações, é bolsista de IC sobre o estudo de categorias de robôs na equipe de robótica do INATEL, a RobotBulls.



Técnicas de Programação Aplicadas ao Desenvolvimento da Robótica Utilizando a Simulação de Futebol

Alexandre B. Lugli, Eduardo A. F. Rezende, Egídio R. Neto, Eugênio M. J. da Silva, Gustavo M. Silva, Luiz Fernando D. R. dos Santos e Wanderson E. Saldanha

INATEL – Instituto Nacional de Telecomunicações

baratella@inatel.br; eduardo.a@gec.inatel.br; egidioneto@inatel.br; eugenio@inatel.br; macedo.gustavo@ges.inatel.br; luizf.santos@inatel.br; wsaldanha@inatel.br

Abstract— This document outlines the composition of a digital soccer team in the 2D category. Its primary goal is to showcase the progress made by the RobotBulls team, as well as to detail the methodologies applied, the computational techniques used, and the results achieved during the project's development.

Index Terms: Artificial intelligence, robotics, simulation,

Resumo— Este documento apresenta a formação de uma equipe de futebol digital na categoria 2D. Seu principal objetivo é mostrar os progressos alcançados pelo time RobotBulls, além de detalhar as metodologias empregadas, as técnicas computacionais utilizadas e os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do projeto.

Palavras-chaves: Inteligência artificial, robótica, simulação.

I. INTRODUÇÃO

Desde as ideias revolucionárias de Alan Turing, que investigavam como máquinas poderiam interagir com o pensamento humano, a inteligência artificial (IA) evoluiu de conceitos teóricos para aplicações concretas. Essa perspectiva histórica fundamenta os avanços modernos na robótica, onde sistemas como o RobotBulls2D demonstram capacidade de tomar decisões complexas em ambientes dinâmicos e simulados [1].

Este estudo apresenta o desenvolvimento de um time de futebol digital denominado RobotBulls2D, controlado por inteligência artificial e executado em simulação computacional. O trabalho oferece uma visão geral do ambiente de simulação e detalha as estratégias de codificação empregadas na criação da equipe. Cada robô opera de forma autônoma, proporcionando uma oportunidade valiosa para aprender sobre robótica e IA (Inteligência Artificial), além de servir como fonte de entretenimento para entusiastas da área [2].

O objetivo é destacar as técnicas de programação, algoritmos de inteligência artificial e comandos necessários para gerenciar um time de futebol digital como o RobotBulls2D.

A estrutura do estudo está organizada em cinco capítulos: capítulo I (Introdução), capítulo II (Configuração do ambiente de simulação), capítulo III (Técnicas avançadas de programação), capítulo IV (Aprimoramento do time RobotBulls2D) e capítulo V (Conclusão).

II. O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A. O Sistema Operacional

No decorrer da pesquisa, foi adotado o sistema operacional *Linux* na versão *Ubuntu 12.04 LTS* de 64 bits.

Essa opção foi feita devido à sua compatibilidade com as bibliotecas do simulador, além de facilitar os processos de instalação e configuração [3]. Após a instalação, o sistema pode ser gravado em um *CD* ou configurado como inicializável em um pendrive utilizando o programa *YUMI* [4].

B. Dependências

Antes de realizar qualquer instalação adicional, é essencial configurar diversas dependências de programas e bibliotecas no sistema operacional. Para facilitar esse processo, uma lista de configuração automática, desenvolvida no decorrer desta pesquisa, está disponível gratuitamente na internet. Esse recurso foi criado para simplificar a instalação e o uso do simulador. Para acessar o arquivo de configuração e consultar sua descrição completa, basta executar os comandos apresentados na Tabela I por meio do terminal.

TABELA I. TABELA DE COMANDOS.

Comandos do terminal
<code>\$ wget http://www.akitem.net/robotic_IA/rcss-install.sh</code>
<code>\$ chmod +x rcss-install.sh</code>
<code>\$ sh rcss-install.sh</code>

Fonte: Akitem.net. [5].

Todos os componentes e configurações da simulação serão instalados de forma automática. Isso inclui as bibliotecas fundamentais para o funcionamento do ambiente *RCSS*, bem como as dependências necessárias para compilar e executar programas em *C/C++* [5].

C. A Linguagem de programação C/C++

Criada por Bjarne Stroustrup no início dos anos 1980 nos Laboratórios *Bell*, a linguagem de programação *C++* é uma evolução do *C*. O *C++* trouxe várias melhorias em relação à sua linguagem predecessora, destacando-se principalmente pela introdução de recursos para programação orientada a objetos. Essa funcionalidade permite uma abordagem mais modular e favorece a reutilização do código, otimizando os recursos disponíveis [6].

D. A Programação Orientada a Objetos (POO)

A programação orientada a objetos (POO) é um paradigma que organiza dados e comportamentos em estruturas chamadas objetos. Em vez de ver os programas como uma sequência linear de instruções, a POO divide o código em partes menores, onde cada objeto tem características (atributos) e funcionalidades (métodos) específicas. Essa metodologia promove a reutilização de código, simplifica a manutenção do software e permite o desenvolvimento de sistemas mais flexíveis e modulares [7].

E. O Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE)

Um IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) é uma ferramenta projetada para aumentar a produtividade dos programadores e melhorar a qualidade dos aplicativos criados. Entre os IDEs disponíveis, o *NetBeans* se destaca como uma opção amplamente utilizada. Trata-se de um projeto de código aberto e gratuito, desenvolvido originalmente pela *Sun Microsystems* [8].

F. O Pacote Simulação do RCSS

Durante a pesquisa, as versões mais recentes utilizadas foram a *rcssserver-19.0.0* para o servidor e a *rcssmonitor-19.0.0* para o monitor, com a última atualização ocorrendo em março de 2024. O *RoboCup Soccer Simulator* é uma ferramenta voltada para a pesquisa e aprendizado em sistemas multiagentes e inteligência artificial. Ele simula jogos de futebol entre dois times, cada um composto por 11 jogadores autônomos. Não há interação humana com os jogadores durante o jogo, que é supervisionado por um árbitro autônomo, embora a intervenção humana possa ser necessária em casos de jogadas controversas [9].

G. A biblioteca padrão *librcsc*

Todos os times criados a partir do *Agent2D* requerem a biblioteca *librcsc*, na versão 4.1.0. A *librcsc* oferece um conjunto de ações que podem ser utilizadas durante a construção e programação dos times [10].

H. O Time base *Helios-Base*

Como construir uma equipe do zero pode ser um processo complexo, os desenvolvedores Hidehisa Akiyama e Hiroki Shimora criaram um kit de ferramentas e uma equipe base para facilitar a montagem de times. A versão oficial, *Helios-Base*, está disponível gratuitamente sob a licença pública *GNU* [11].

I. Inicialização do Server e do Monitor

Para os jogos serem rodados, precisamos de dois outros algoritmos, o *rcssserver* e o *rcssmonitor*. O *rcssserver* é responsável pela funcionalidade do *back-end*, como por exemplo o vento, a gritaria da plateia, entre outras variáveis que estão presentes no algoritmo. Já o *rcssmonitor* é apenas o *front-end*, onde é possível ver o jogo acontecendo. Para iniciar esses dois algoritmos é necessário executar o comando: `“./rcssserver”` para executar o *server*, e `“./rcssmonitor”` para rodar o monitor.

III. TÉCNICAS AVANÇADAS DE PROGRAMAÇÃO

O ambiente de simulação é inteiramente parametrizado por meio de um único arquivo de configuração em lote. Contudo, a complexidade associada à configuração específica de cada time vai além das abordagens tradicionais de programação. Essa sofisticação é obtida por meio da implementação de métodos avançados, como redes neurais artificiais, lógica difusa e aprendizado de máquina. Esses elementos permitem a criação de times com capacidade adaptativa, ajustando suas estratégias de acordo com diferentes cenários encontrados no jogo [12].

A. Lógica difusa (Fuzzy Logic)

A lógica difusa, ou *fuzzy logic*, é uma abordagem computacional projetada para lidar com incertezas e ambiguidades. Diferentemente da lógica tradicional, que utiliza valores binários como "verdadeiro" (1) ou "falso" (0), a lógica difusa permite a atribuição de graus intermediários de veracidade, variando entre "0" e "1". Essa flexibilidade possibilita descrever estados como "parcialmente verdadeiro" ou "muito verdadeiro", oferecendo uma modelagem mais próxima do raciocínio humano. Essa característica torna a lógica difusa especialmente útil para representar situações complexas e subjetivas de forma computacionalmente eficiente [13].

B. Aprendizado de Máquina (AM)

O aprendizado de máquina baseia-se na experiência acumulada para melhorar a tomada de decisões futuras. Trata-se de um sistema que, essencialmente, evolui com base em dados passados [14].

No contexto de futebol simulado, um exemplo frequente é o aprendizado por reforço. Nesse método, o sistema realiza testes constantes durante o jogo, armazenando os resultados em arquivos de texto ou binários. Esses registros são processados por um algoritmo de ponderação que destaca os resultados mais eficazes para situações específicas. Essas informações, posteriormente, são utilizadas para guiar decisões futuras, promovendo um desempenho mais eficiente ao longo do tempo.

C. Redes Neurais Artificiais

Redes neurais artificiais são sistemas distribuídos e paralelos capazes de processar múltiplas entradas simultaneamente, produzindo saídas específicas. Ao contrário de abordagens analíticas tradicionais, essas redes permitem a exploração de diversas hipóteses relacionadas à tomada de decisão dos jogadores. Ajustando os mecanismos de aprendizado, é possível integrar pesos distintos às decisões, além de incorporar elementos como assimetria de informação, dados incompletos e limitações cognitivas.

Esses modelos possibilitam avaliar o impacto de diferentes variáveis sobre os resultados do jogo. A comparação entre os desempenhos observados e os esperados, considerando as abordagens analíticas e os dados obtidos, permite uma análise aprofundada da eficácia das estratégias implementadas [15].

IV. MODIFICAÇÕES FEITAS NO TIME

Após a instalação e configuração do *RCSS*, é criado um diretório chamado *teams* na pasta pessoal do usuário. Esse diretório inclui o time *Helios Base* e uma cópia do *RobotBulls*, já preparada para alterações. Para iniciar, abra o IDE *NetBeans* e crie um novo projeto *C/C++* com "Códigos-Fonte Existentes". Na próxima janela, localize o diretório *robotbulls* e conclua o processo. O código-fonte necessário está na pasta *src*. Devido às diversas alterações realizadas, os arquivos modificados estão disponíveis para consulta em "*RobotBulls - Time modificado a partir do Agent2D*" [16].

A seguir, detalhamos as modificações aplicadas ao time *RobotBulls2D*, com o objetivo de corrigir erros, otimizar

decisões e melhorar outros aspectos. Essas mudanças foram inspiradas em análises de outros times, feedbacks de desenvolvedores e observações realizadas durante partidas [17].

A. Roteiro de Inicialização

Um arquivo específico foi criado para centralizar as instruções de inicialização do time. Esse arquivo permite configurar aspectos como o nome do time e os parâmetros de inicialização. Essa abordagem não apenas simplifica o gerenciamento, mas também possibilita a personalização do comportamento inicial do time de acordo com diferentes estratégias ou objetivos específicos.

B. Configuração da defesa (*defense-formation.conf*)

O time *Helios_Base*, que serviu como base para o desenvolvimento, apresentava uma falha crítica no posicionamento defensivo, particularmente na organização dos zagueiros. Essa vulnerabilidade comprometia a eficiência da linha defensiva, tornando-a suscetível a ataques rápidos. Para corrigir essa falha, o arquivo *defense-formation.conf*, localizado na pasta *formations-df*, foi modificado. As mudanças implementadas ajustaram o posicionamento dos zagueiros, melhorando a cobertura e a capacidade de interceptação em situações de pressão ofensiva, somado a isso alterações foram realizadas no arquivo para que outras alterações sejam feitas com maior facilidade no futuro.

C. Movimentação Básica

A movimentação dos jogadores no campo é um aspecto essencial para garantir um desempenho estratégico. O arquivo responsável por essa funcionalidade foi revisado para otimizar o posicionamento dinâmico dos atletas durante o jogo. Alterações significativas foram realizadas para melhorar a interceptação da bola, especialmente em situações em que o time adversário tem a posse.

D. Interceptação Básica

O processo de interceptação da bola foi aprimorado com a inclusão de uma função da biblioteca padrão, *Body Intercept()*. Essa função foi integrada ao código para fornecer uma abordagem mais robusta e eficiente no cálculo das trajetórias de interceptação. O ajuste foi especialmente útil em cenários de alta pressão, onde decisões rápidas são cruciais para impedir ataques adversários.

E. O papel de atacante (*role_center_forward.cpp*)

O atacante desempenha um papel crucial no desempenho ofensivo do time. O arquivo *role_center_forward.cpp* foi significativamente modificado para aprimorar a eficiência dos movimentos e das finalizações. Os métodos *doMove()* e *doKick()* receberam ajustes que permitem ao atacante tomar decisões baseadas na posição da bola e no contexto geral do jogo. Além disso, quatro novos comportamentos foram implementados, aumentando a versatilidade do jogador em diferentes situações de ataque. Esses comportamentos, listados na Tabela II, foram desenvolvidos para explorar variações estratégicas e oferecer mais opções táticas:

TABELA II. ARQUIVOS DE CÓDIGO-FONTE.

<i>bhv_attacker_offensive_move.cpp</i>
<i>bhv_cross.cpp</i>
<i>bhv_pass_test.cpp</i>
<i>Bhv_self_test.cpp</i>

F. O papel de Centroavante (*role_side_forward.cpp*)

O centroavante recebeu atualizações que visam melhorar sua contribuição ao ataque. Dois novos comportamentos foram introduzidos para expandir suas opções de movimentação e finalização, com foco em cenários de jogo que exigem criatividade tática. Esses comportamentos, listados na Tabela III, foram incorporados para explorar novas possibilidades ofensivas [16].

TABELA III. ARQUIVOS DE CÓDIGO-FONTE.

<i>body_kick_to_corner.cpp</i>
<i>body_kick_to_frontspace.cpp</i>

G. A estratégia do Time (*strategy.cpp*)

A estratégia global do time é gerenciada no arquivo *strategy.cpp*, que contém as definições de formações, papéis dos jogadores e táticas principais. Este arquivo foi expandido para incluir novas formações ofensivas, projetadas para maximizar o desempenho em diferentes cenários de jogo. As formações adicionadas estão descritas na Tabela IV [16]:

TABELA IV. ARQUIVOS DE CÓDIGO-FONTE

Nome	Tática
<i>offense-formation1.conf</i>	433 – Tipo 1
<i>offense-formation2.conf</i>	433 – Tipo 2
<i>offense-formation3.conf</i>	4321
<i>offense-formation4.conf</i>	4231
<i>offense-formation5.conf</i>	442

Essas formações foram testadas em partidas simuladas, sendo ajustadas com base nos resultados observados. Quando uma formação se mostra eficaz, especialmente após um gol, ela é mantida até o final do jogo ou até o time sofrer um empate. Essa abordagem dinâmica permite explorar combinações táticas e identificar configurações ideais para diferentes situações.

H. Arquivo de compilação (*MakeFile.am*)

Por fim, para garantir que todas as alterações realizadas sejam corretamente integradas ao sistema, o arquivo *MakeFile.am*, localizado no diretório *src*, foi atualizado. Este arquivo informa ao compilador sobre os novos arquivos adicionados e possibilita alterações nos nomes dos binários gerados para o técnico e para o time. Isso assegura que todas as mudanças sejam refletidas no processo de construção, evitando erros durante a execução.

V. CONCLUSÃO

As modificações implementadas no time *RobotBulls2D* ao longo dos anos resultaram em um desempenho notável em diversas competições de robótica. Em 2013, as alterações realizadas permitiram uma significativa melhoria na eficiência do time, culminando, em 2014, na aprovação da equipe para participar do Campeonato Latino-Americano de Robótica (*LARC/CBR*). Nesta competição, a equipe conquistou o 8º (oitavo) lugar, conforme ilustrado na Figura 1 [18].

Place	Team	Points
1	 Nexus2D	16
2	 ITAndroids	13
3	 sirsoccer	12
4	 Expertinos	11
5	 FCP_GPR_2014	10
6	 UFSJ2D	7
7	 Tropeiros	6
8	 RobotBulls2D	5

Figura 1. Classificação Final. (LARC/CBR 2014)

O ano de 2015 consolidou ainda mais sua reputação. Nesse ano, a equipe foi novamente habilitada a competir no LARC/CBR, onde conquistou o 2º (segundo) lugar, conforme mostrado na Figura 2 [19].

Ranking of LARC/CBR 2015:

Champion: ITAndroids (ITA-SP)

Runner-up: RobotBulls (INATEL-MG)

3rd Place: FCP_GPR (UTFPR-PR)

Figura 2. Classificação Final. (LARC/CBR2015).

Em 2022, o RobotBulls2D retornou às competições na *IronCup*, organizada pelo Inatel, garantindo a 3ª (terceira) posição em sua categoria.

Em 2023, a equipe manteve sua participação, competindo no LARC/CBR e na *IronCup*, obtendo o 5º (quinto) lugar em ambas as competições.

O ano de 2024 foi promissor, com a equipe participando da RCX, onde conquistou a 3ª (terceira) colocação, e do LARC/LARS, alcançando novamente o 3º (terceiro) lugar. Esses resultados demonstram a capacidade do RobotBulls2D de competir em alto nível, mesmo diante de adversários altamente qualificados.

Em 2025, a equipe já se prepara para novos desafios, buscando manter sua posição de destaque e continuar contribuindo para o avanço da robótica no cenário competitivo.

O futebol continua sendo uma plataforma de pesquisa inovadora na área de Inteligência Computacional. O ambiente dinâmico e imprevisível do jogo oferece um espaço único para o desenvolvimento e validação de algoritmos que promovem a autonomia e a colaboração entre agentes artificiais.

Através da simulação de partidas que replicam as condições do futebol real, é possível explorar conceitos como aprendizado adaptativo, planejamento estratégico e cooperação em equipe. O conhecimento adquirido nesse processo pode ser aplicado não apenas em robótica, mas também em esportes humanos, contribuindo para análises mais precisas e para o desenvolvimento de tecnologias avançadas.

A integração entre as realidades simuladas e físicas aponta para um futuro onde inovações desenvolvidas em ambientes artificiais poderão transformar o modo como compreendemos e jogamos futebol, tanto no âmbito humano quanto no artificial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [1] TURING, Alan. **A Surfing Scientist; The Mathematics of Computation**. The New York Times, 1997. Site de internet disponível em: <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/library/cyber/surf/1106surf-turing.html>. Acesso em 28/09/2024
- [2] ROBOCUP, **RoboCup Soccer Simulator**. Site de internet disponível em: <<https://ssim.roboocup.org>> . Acesso em: 29/07/2024.
- [3] UBUNTU, **Ubuntu 12.04.5 LTS (Precise Pangolin)**. Site de internet disponível em: <<http://releases.ubuntu.com/12.04/>> . Acesso em: 11/01/2016.
- [4] USB CREATOR TOOLS, **YUMI – Multiboot USB Creator**. Site de internet disponível em: <<http://www.pendrivelinux.com/yumi-multiboot-usb-creator/>> . Acesso em: 11/01/2016.
- [5] DORNELAS, H. M. **RCSS Configuração Automática**. Arquivo de configuração em lotes. Disponível em: <http://www.akitem.net/robotic_IA/rcss-install.sh>. Acesso em: 16/02/1983.
- [6] Deitel, H. M., Deitel, P. J. **C++: como programar**. trad. Carlos Arthur Lang Lisboa e Maria Lúcia Lang Lisboa. - 3.ed. – Porto Alegre:Bookman, 2001.
- [7] GASPAROTTO, H. M.. **Os 4 pilares da Programação Orientada a Objetos**. Site de internet disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/os-4-pilares-da-programacao-orientada-a-objetos/9264>>. Acesso em: 11/01/2016.
- [8] SUN MICROSYSTEM. Netbeans IDE. Ambiente de desenvolvimento. Disponível em: <<https://netbeans.org/downloads/>>. Acesso em: 16/02/1983
- [9] ROBOCUP, **RoboCup Soccer Simulator**. Site de internet disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/sserver/files/rcssserver/>> . Acesso em: 11/01/2016.
- [10] AKYAMA, Hidehisa. **RCSS Library**. Site de internet disponível em: <<http://en.osdn.jp/projects/rctools/downloads/51941/librcsc-4.1.0.tar.gz>>. Acesso em: 10/02/2016.
- [11] AKYAMA, Hidehisa. SHIMORA, Hiroki. **Base Team Agent**. Site de internet disponível em: <<http://en.osdn.jp/projects/rctools/downloads/55186/agent2d-3.1.1.tar.gz/Brazil2D>>. Acesso em 10/02/2016.
- [12] GIMENES, André B. **Aplicação De Redes Neurais E Lógica Fuzzy Na Simulação Do Jogo De Barchanha Com Ultimato**. Monografia UNICAMP. Campinas, 2009.
- [13] COX, E. **The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems**. New York: AP Professional, 1994.
- [14] REZENDE, Solange O. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. Barueri: Manole, 2005.
- [15] ARAÚJO, L.J.S. **Modelagem computacional de jogos complexos usando Redes Neurais e Lógica Fuzzy**. Tese de doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2002.
- [16] ROBOTBULLS. **Time modificado com base no Agent2D**. Arquivos de configuração alterados. Disponível em: <http://akitem.net/robotic_IA/robotbulls/>. Acesso em: 16/02/2016.
- [17] SILVA, P. H. G. **Ajustes No Time Ufla2d No Domínio De Futebol De Robôs**. Monografia, UFLA. Lavras, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/4993/1/MONOGRAFIA_Ajustes_no_time_UFLA2D_no_dominio_de_futebol_de_robos.pdf>. Acesso em: 16/02/2016.
- [18] ROBOCUP LARC/CBR, **Soccer Simulation League 2D 2014**. Site de internet disponível em: <<http://www.dainf.ct.utfpr.edu.br/~fabro/larc2014/>>. Acesso disponível em: 16/02/2016.
- [19] ROBOCUP LAR/CBR, **Soccer Simulation League 2D 2015**. Site de internet disponível em: <<http://www.akitem.net/larc2015/>>. Acesso disponível em: 16/02/2016

Estudo Sobre Métodos de Programação de um Robô para a Categoria Sumô LEGO®

Alexandre Baratella Lugli, Eugênio Moreira Jonas da Silva,
Egídio Raimundo Neto, Luís Fernando Domiciano Ribeiro dos Santos,
Wanderson Eleutério Saldanha, Luiz Gustavo de Oliveira Costa

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
baratella@inatel.br, eugenio@inatel.br, egidioneto@inatel.br, luizf.santos@inatel.br,
wsaldanha@inatel.br, luiz.g@gec.inatel.br

Resumo—O Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), referência em ensino, pesquisa e inovação tecnológica, promove a formação de futuros profissionais por meio de iniciativas que unem teoria e prática. Entre os projetos desenvolvidos pelos alunos e professores do laboratório de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação, nomeado como "Robotbulls", destacam-se os robôs da categoria Sumô LEGO®. Este artigo tem como objetivo realizar um Estudo Sobre Técnicas de Programação para Robôs na Categoria Sumô LEGO®, com foco nos controladores NXT, EV3. A análise aborda estratégias de programação baseadas em sensores, algoritmos de controle e adaptação comportamental, explorando o potencial de cada controlador. Este estudo busca não apenas aprimorar o desempenho dos robôs em competições, mas também contribuir para a formação tecnológica dos alunos do INATEL, consolidando seu papel como referência educacional na área de robótica.

Palavras chave—LEGO®, Programação, Sumô, Controladores, NXT, EV3.

Abstract—The National Institute of Telecommunications (INATEL), a reference in teaching, research, and technological innovation, promotes the training of future professionals through initiatives that combine theory and practice. Among the projects developed by students and professors in the Department of Electrical Engineering and Control and Automation Engineering, named "Robotbulls," stand out LEGO® Sumô robots. This article aims to conduct a Study on Programming Techniques for Robots in the LEGO® Sumô Category, focusing on the NXT and EV3 controllers. The analysis addresses programming strategies based on sensors, control algorithms, and behavioral adaptation, exploring the potential of each controller. This study seeks not only to improve the performance of robots in competitions but also to contribute to the technological education of INATEL students, consolidating its role as an educational reference in the field of robotics.

Index Terms—LEGO®, Programming, Sumo, Controllers, NXT, EV3.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, a LEGO® é amplamente reconhecida não apenas por suas peças de montagem, mas também por sua contribuição no desenvolvimento de robôs, especialmente no âmbito de competições.

Nos últimos anos, pesquisas vêm destacando a importância da robótica educacional aliada à competição como ferramenta de desenvolvimento técnico e cognitivo. Trabalhos recentes,

como o de Maurer (2022), demonstram que plataformas como o LEGO Spike Prime estão sendo cada vez mais integradas em cenários competitivos devido à sua flexibilidade e ao suporte a linguagens modernas como MicroPython[1]. Além disso, iniciativas como a RoboCup Junior[2] e o All Japan Robot-Sumo Tournament[3] reforçam a relevância internacional dessa linha de pesquisa, mostrando que o uso de kits LEGO continua sendo um eixo central para desenvolvimento de estratégias de inteligência robótica em ambientes restritos e competitivos.

A categoria Sumô LEGO®, em particular, se destaca, pois exige que os robôs sejam exclusivamente construídos com peças da marca, estimulando habilidades como programação, engenharia e resolução de problemas. Este artigo explora as técnicas de programação aplicadas aos robôs de Sumô LEGO®, com foco nas plataformas de controle NXT e EV3, buscando entender como essas ferramentas contribuem para o aprimoramento do desempenho dos robôs em competições.

O robô da categoria LEGO®, além de suas peças básicas, conta com um elemento essencial para seu funcionamento: os controladores. Dentre os controladores disponíveis, destacam-se o NXT e o EV3, que oferecem diferentes recursos e funcionalidades. O NXT foi um dos primeiros sistemas a permitir a criação de robôs autônomos, oferecendo conectividade, motores e sensores. Já o EV3, uma evolução do NXT, proporciona mais potência de processamento, melhor conectividade e uma gama ampliada de sensores.

A categoria consiste em empurrar o robô adversário para fora de um Dojo, uma estrutura circular confeccionada em MDF, com dimensões específicas, de forma análoga ao que ocorre nas competições de sumô tradicionais. No entanto, neste contexto, os robôs são construídos exclusivamente com peças LEGO®.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Regras

A categoria Sumô LEGO® segue um conjunto de regras estabelecido pela RoboCore® [4]. Cada competição é realizada entre duas equipes, com no máximo dois membros presentes no local, sendo um piloto e um acompanhante. Apenas o piloto está autorizado a operar o robô durante os rounds. A disputa é composta por três rounds, e, caso haja empate, um quarto round é necessário para determinar o vencedor.

A categoria impõe restrições rigorosas quanto ao material, tamanho e peso dos robôs, que são verificadas antes de cada

disputa. Utiliza-se um gabarito para assegurar que os robôs atendam às dimensões máximas de 15,2 cm de largura e comprimento, e uma balança de precisão é empregada para garantir que o peso não ultrapasse 1 kg. Essas limitações físicas promovem um equilíbrio entre as equipes, tornando as estratégias de montagem e programação ainda mais cruciais para o desempenho superior de um robô em relação ao outro.

O Dojô [1], onde as lutas são realizadas, é construído em madeira laminada de alta pressão, com formato circular e diâmetro de 77 cm. Ele é delimitado por uma borda branca de espessura de 2,5 cm. A superfície do Dojô contém duas linhas marron, chamadas Shikiri, localizadas no centro do ringue. Essas linhas têm 1 cm de largura, 10 cm de comprimento e estão espaçadas 10 cm entre si.



Fig. 1. Dojô.

No início da partida, as equipes posicionam seus robôs de acordo com a estratégia desejada após uma contagem regressiva de três segundos. Esse posicionamento deve ser feito atrás das Shikiri; caso esse requisito não seja cumprido, a equipe recebe uma advertência. Quando uma equipe acumula duas advertências durante a luta, ela é desclassificada da partida em andamento. Após o posicionamento dos robôs e a verificação do juiz, uma nova contagem regressiva é iniciada para o começo da luta. O piloto de cada equipe ativa seu robô e, após uma pausa obrigatória de 5 segundos, os robôs podem começar a se mover. Caso a equipe não cumpra essa pausa, também receberá uma advertência.

A luta é finalizada quando um dos robôs é empurrado para fora do Dojô, e o robô que permanecer no Dojô recebe um ponto. A equipe que conseguir alcançar dois pontos primeiro, em até três rounds, é declarada vencedora. Em caso de empate, o juiz realiza um round de desempate, no qual os robôs não são posicionados pelos pilotos, mas sim pelo próprio juiz, que determina a forma inicial para o início da luta. Após isso, a partida segue normalmente, e o vencedor desse round conquista a vitória na partida.

B. Programação

Devido às limitações físicas da categoria, a programação desempenha um papel fundamental no desempenho do robô. Através dela, as equipes determinam o comportamento do robô, levando em consideração seus próprios movimentos e os movimentos do robô adversário. Cada equipe desenvolve a estratégia que considera mais eficaz para cada um de seus

robôs, levando em conta variáveis como o estilo de luta do robô, o controlador utilizado (NXT ou EV3) e os sensores empregados, otimizando a performance e a capacidade de reação durante a partida.

C. Controladores

Os controladores são dispositivos essenciais para o funcionamento e controle dos robôs. Eles servem como o "cérebro" do robô, recebendo e processando informações dos sensores e enviando comandos para os motores e outros componentes. Os controladores podem ser programados para executar tarefas específicas e responder a estímulos externos, como a detecção de obstáculos ou o movimento do robô adversário. Em competições como Sumô LEGO®, controladores populares incluem o NXT e o EV3, que oferecem interfaces amigáveis e flexibilidade para programar e controlar os robôs.

- LEGO® NXT [5]: É um controlador desenvolvido para a linha LEGO Mindstorms, amplamente utilizado em projetos de robótica e competições. Lançado em 2006, o NXT possui um microcontrolador ARM7 de 32 bits com 48 MHz, permitindo a programação e o controle de robôs por meio de uma interface acessível. O dispositivo é equipado com 3 portas para conectar motores e 4 portas para sensores. Sua memória é composta por 64 KB de RAM e 256 KB de memória flash, e a conectividade é feita via Bluetooth e cabo USB.

O NXT pode ser programado utilizando um ambiente de programação visual, como o software LEGO Mindstorms NXT-G, ou por meio de linguagens de programação, como o NXC (Not eXactly C). Sua flexibilidade e recursos fazem do NXT uma escolha popular tanto para iniciantes quanto para equipes avançadas de robótica.



Fig. 2. Controlador NXT.

- LEGO® EV3 [6]: Sucedendo o NXT e oferecendo recursos aprimorados para projetos e competições de robótica, o EV3 foi lançado em 2013 e conta com um processador ARM9 de 300 MHz, significativamente mais rápido que o NXT, proporcionando maior capacidade de processamento para tarefas mais complexas. Ele possui 64 MB de RAM e 16 MB de memória flash, além de maior capacidade de conectividade, incluindo Wi-Fi, Bluetooth e USB. O design modular do EV3 permite a conexão de 4 sensores e 4 motores, oferecendo flexibilidade para diferentes configurações de robôs.

O EV3 pode ser programado utilizando o software LEGO Mindstorms EV3, que oferece uma interface de programação visual, ou por meio de linguagens de programação como Python, C e Java, proporcionando maior flexibilidade para programadores avançados. Sua

maior capacidade de processamento, flexibilidade e compatibilidade com uma ampla gama de sensores tornam o EV3 uma plataforma robusta e versátil para robótica educacional e competições.



Fig. 3. Controlador EV3.

- LEGO® Spike Prime[7]: É um controlador utilizado para projetos educacionais de robótica. Ele conta com um hub programável com um processador de 100 MHz, 320 KB de RAM e 1MB de memória flash, equipado com 32 MB para armazenar programas e outros conteúdos. O hub também possui uma matriz de LED 5x5, 6 portas de entrada/saída, conectividade Bluetooth e suporte para a plataforma MicroPython, oferecendo flexibilidade para programadores de diversos níveis.

Embora seja uma plataforma poderosa para robótica educacional, sua utilização na categoria de Sumô LEGO ainda não é muito comum. A principal razão para isso é que o SPIKE Prime, com sua base voltada para o ensino de programação e robótica em um ambiente educacional, é relativamente novo em comparação com os controladores como o NXT e o EV3. Além disso, a complexidade e o custo do SPIKE Prime ainda o tornam menos acessível para equipes que buscam soluções mais diretas e com menor investimento inicial para essas competições.



Fig. 4. Controlador Spike Prime.

III. METODOLOGIA

A. Sensores

Os sensores são componentes essenciais no contexto da robótica, especialmente em competições como o Sumô LEGO, onde a precisão e a resposta rápida às condições do ambiente são fundamentais para o desempenho do robô. No caso dos controladores LEGO, como o NXT e o EV3, diversos sensores podem ser integrados para melhorar a interação do robô com seu ambiente.

- Sensor Ultrassônico: Mede a distância entre o robô e objetos ao redor, crucial para detecção de obstáculos

ou robos inimigos e cálculo de posicionamento. Sua precisão e capacidade de resposta rápida tornam o sensor fundamental para otimizar o desempenho em competições, possibilitando decisões em tempo real.

- Sensor de Toque: Detecta quando o robô entra em contato com um objeto, sendo fundamental para estratégias específicas durante a luta.

Quando integrados a uma boa estratégia de programação, esses sensores proporcionam uma capacidade de resposta às variações no ambiente, conferindo ao robô agilidade e eficiência necessárias para enfrentar os desafios do combate.

B. Estilos de programação

b.1) Programação com Blocos

O LEGO Mindstorms[8] é uma plataforma de robótica educacional projetada para facilitar o aprendizado de programação e conceitos de engenharia. Uma de suas características mais notáveis é a utilização de uma interface de programação baseada em blocos, acessível por meio de softwares como o LEGO Mindstorms EV3 Software ou o SPIKE App, dependendo do modelo.

Essa abordagem visual permite que os usuários desenvolvam programas organizando blocos que representam comandos específicos, como controle de motores, leitura de sensores, execução de loops e tomadas de decisão condicionais. Essa interface é especialmente eficaz para iniciantes, pois elimina a necessidade de conhecimento prévio em linguagens de programação textual, promovendo um ambiente intuitivo e interativo para o aprendizado.

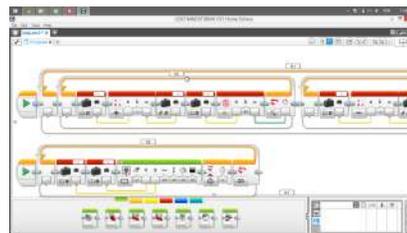


Fig. 5. Exemplo de programação em blocos no software LEGO Mindstorms EV3.

b.2) Linguagens de programação

Os controladores NXT e EV3, da linha LEGO Mindstorms, são compatíveis com uma variedade de linguagens de programação, atendendo a diferentes níveis de conhecimento e exigências. O NXT pode ser programado utilizando linguagens como NXT-G, uma interface visual intuitiva voltada para iniciantes; NXC (Not eXactly C), baseada em C, permitindo maior controle sobre o robô; LeJOS, que possibilita o uso de Java para programação mais avançada; e RobotC, amplamente utilizado em competições pela sua flexibilidade e controle. Por outro lado, o EV3, com maior capacidade de processamento, oferece suporte a linguagens como EV3-G, sua linguagem visual nativa; Python, oficialmente integrado para facilitar a programação de alto nível; RobotC, proporcionando controle avançado; Java, por meio de plataformas como LeJOS; além de C/C++ e MATLAB/Simulink, ampliando consideravelmente as

opções para controle e simulação. Ambos os controladores se destacam pela flexibilidade, sendo o EV3 mais adequado para projetos mais complexos devido ao seu poder de processamento superior.

Entre as diversas linguagens disponíveis, destaca-se o RobotC, uma das mais utilizadas em competições de robótica. Sua eficiência, flexibilidade e controle avançado sobre os sensores e motores fazem dela uma escolha preferencial. Baseado em C, o RobotC permite a criação de algoritmos sofisticados e multitarefas, ideais para estratégias dinâmicas em competições como o Sumô LEGO. Seu ambiente de desenvolvimento integrado, com ferramentas de depuração e simulação, facilita o desenvolvimento e a otimização de programas, enquanto seu desempenho otimizado garante respostas rápidas e precisas, características essenciais para o sucesso em competições de alta performance.

C. Biblioteca

No EV3-G, a linguagem de programação visual do LEGO Mindstorms EV3, não é possível criar bibliotecas no sentido tradicional, como em linguagens de programação textuais. No entanto, é possível criar blocos personalizados, que funcionam de maneira semelhante a bibliotecas. Esses blocos podem agrupar funções ou sequências de comandos reutilizáveis em diferentes projetos, o que permite otimizar e modularizar o código. Embora a funcionalidade seja limitada em comparação com bibliotecas textuais, ela oferece uma forma eficiente de reutilizar código dentro do ambiente visual do EV3.

Já no RobotC, a criação de bibliotecas tradicionais, como em linguagens como C ou C++, não é diretamente suportada. Embora não seja possível criar arquivos de biblioteca .h ou .c, o RobotC permite a organização do código através de funções e procedimentos. Essas funções podem ser usadas para encapsular blocos de código reutilizáveis ao longo do programa, proporcionando uma modularização limitada. No entanto, o código precisa ser geralmente mantido em um único arquivo, o que restringe a modularização completa que bibliotecas externas poderiam proporcionar. Embora a divisão do código em funções seja possível, a estrutura do RobotC não oferece um gerenciamento nativo adequado para bibliotecas externas, tornando a reutilização de código menos flexível em comparação com outras linguagens de programação.

IV. ESTUDO

A. Detectando o adversario

A identificação precisa da posição do adversário é crucial durante uma luta, permitindo que o robô execute ataques estratégicos. Para isso, são utilizados sensores ultrassônicos, sensores de toque e uma programação eficiente, que permitem ao robô navegar pelo Dojô de maneira controlada.

A maioria dos robôs emprega dois sensores ultrassônicos, cujas medições são fundamentais para ajustar o controle dos motores de forma precisa, garantindo movimentações estratégicas e eficazes durante a competição. O exemplo a seguir ilustra uma das abordagens para realizar a detecção do adversário e o controle dos motores de forma eficiente.



Fig. 6. Exemplo de código em RobotC para detectar o robô adversário.

B. Jogadas

Uma das jogadas mais comuns em competições de Sumô LEGO é o empurrão direto, no qual o robô avança para frente com o objetivo de empurrar o oponente para fora do dojô. Essa estratégia é frequentemente adotada por robôs de ariete, cujo design é focado na aplicação de grande força física, visando, muitas vezes, tombar o robô adversário. Robôs mais robustos, projetados para resistência e poder de impacto, utilizam essa técnica para pressionar continuamente o oponente, dificultando sua movimentação e reação. A programação desses robôs é otimizada para garantir que eles mantenham uma linha reta, maximizando a eficácia do empurrão.

Por outro lado, robôs com características diferentes, como robôs rápidos ou aqueles com design de "asa", preferem estratégias mais dinâmicas, utilizando movimentos circulares ou curvados para desviar do adversário e pegá-lo lateralmente. Esse tipo de jogada busca criar ângulos favoráveis para atacar, evitando o confronto direto frontal, que poderia resultar em uma perda de posição ou força. A agilidade desses robôs permite que eles se repositionem rapidamente, aproveitando as falhas no movimento do adversário e criando oportunidades de empurrá-lo de forma eficiente.

V. COMPARATIVO

O NXT, o EV3 e o Spike são controladores de robótica com características distintas que atendem a diferentes necessidades. O NXT é ideal para iniciantes, oferecendo uma interface simples e acessível, mas com limitações em termos de processamento e capacidade de expansão. O EV3, mais avançado, oferece maior poder de processamento, memória expandida e suporte a diversas linguagens de programação, tornando-se mais adequado para competições e projetos complexos. Embora o spike apresente recursos avançados e flexibilidade, ele ainda não é amplamente adotado, o que limita seu uso em competições como o Sumô LEGO. A escolha entre esses controladores depende da experiência da equipe, da complexidade do projeto e das necessidades de conectividade. O EV3 é geralmente a opção mais robusta para desafios mais exigentes, enquanto o NXT é mais adequado para iniciantes. O spike, apesar de promissor, ainda enfrenta desafios devido à sua adoção limitada.

VI. CONCLUSÃO

A programação desempenha um papel essencial no sucesso de um robô de Sumô LEGO®, sendo o verdadeiro diferencial entre uma equipe vencedora e as demais. É por meio de algoritmos bem elaborados que o robô é capaz de interpretar os dados dos sensores, tomar decisões rápidas e executar

estratégias eficazes no Dojô. Embora uma montagem robusta e funcional seja importante, é a programação que possibilita movimentos precisos, detecção eficiente do adversário e adaptação às dinâmicas da luta. Assim, uma programação inteligente não só potencializa o desempenho do robô, mas também destaca a equipe como estrategista e inovadora, consolidando sua vantagem competitiva.

A. Resultados Finais

A equipe Robotbulls tem se destacado nas competições de robótica do Brasil devido ao aprimoramento contínuo da programação de seus robôs. A utilização eficiente dos controladores NXT e EV3 permite um controle preciso dos motores e sensores, essenciais para garantir movimentos rápidos e estratégicos. A programação avançada é o diferencial que mantém a equipe no topo das competições, adaptando-se rapidamente às diferentes situações no Dojô.

Ao longo de sua trajetória, a equipe Robotbulls conquistou uma série de prêmios, destacando-se nas seguintes competições:

- 1º lugar na Iron Cup 2020;
- 1º e 3º lugar na Iron Cup 2022;
- 2º e 3º lugar na Iron Cup 2023;
- 1º, 2º e 3º lugar na Iron Cup 2024;
- 3º lugar na RCX 2024;
- 3º lugar na Copa Turing 2018.

REFERÊNCIAS

- [1] Aaron Maurer. *Design Innovative Robots with LEGO SPIKE Prime* by Aaron Maurer. 2022. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/design-innovative-robots/9781801811576/>.
- [2] RobocupJunior. *Soccer, Rescue, and OnStage Rules 2023*. 2023. URL: <https://junior.robocup.org/>.
- [3] FUJISOFT Inc. *All Japan Robot-Sumo Tournament*. 2024. URL: <https://www.fsi.co.jp/robot/>.
- [4] RoboCore®. *Regras SUMÔ*. URL: <https://robocore-eventos.s3.sa-east-1.amazonaws.com/public/Regras+-+Sumo.pdf> (acesso em 27/11/2024).
- [5] *LEGO Mindstorms NXT*. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lego_Mindstorms_NXT.
- [6] *LEGO Mindstorms EV3*. 2024. URL: <https://education.lego.com/en-us/products/lego-mindstorms-education-ev3-core-set-/5003400>.
- [7] *LEGO Education Spike Prime*. 2024. URL: <https://spike.legoeducation.com/prime/>.
- [8] FLLCasts. *EV3 Phi. Starting EV3-G software. What are projects and programs?* 2024. URL: <https://www.fllcasts.com/tutorials/364-ev3-phi-starting-ev3-g-software-what-are-projects-and-programs>.

AUTOR

Luiz Gustavo de Oliveira Costa é graduando do 6º período do curso de Engenharia de Computação no Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL. Além disso, atua como bolsista de iniciação científica na equipe de robótica Robotbulls, integrante da categoria Sumô LEGO® contribuindo diretamente para o desenvolvimento de robôs.



Estabelecimento de Chave Criptográfica utilizando Características do Canal sem fio como Segredo

João Gabriel F. Ribeiro, Ítalo Augusto S. Tacca, Guilherme P. Aquino,
Luciano L. Mendes e Vanessa M. Rennó

Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), Laboratório de Cyber Segurança e Internet das Coisas (CS&I Lab.)
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
joao.g@get.inatel.br, italo.augusto@inatel.br,
guilhermeaquino@inatel.br, lucianol@inatel.br, vanessarenno@inatel.br

Resumo—O avanço das tecnologias de comunicação sem fio trouxe benefícios à conectividade e automação, mas também aumentou preocupações com a segurança da informação. Para mitigar riscos, este trabalho investiga um método de estabelecimento de chaves baseado nas propriedades do canal sem fio. Esse método se destaca por exigir baixo poder computacional e consumo de energia, sendo viável para redes B5G e IoT. Foram analisados métodos de reconciliação de informação, avaliando códigos corretores de erro e cenários de propagação. Os resultados demonstram o impacto do tamanho das sequências na taxa de sucesso da reconciliação, reforçando a viabilidade do canal físico como mecanismo de geração de chaves para segurança em comunicações sem fio emergentes.

Palavras chave—Segurança da Informação, Estabelecimento de Chaves, Comunicação Sem Fio.

Abstract—The advancement of wireless communication technologies has improved connectivity and automation but also raised security concerns. This study investigates a key establishment method based on the physical properties of the wireless channel. The method requires low computational power and energy consumption, making it viable for B5G and IoT networks. Reconciliation methods were analyzed, considering error-correcting codes and propagation scenarios. Results show that sequence length impacts reconciliation success, reinforcing the feasibility of the physical channel for key generation in secure wireless communications.

Index Terms—Information Security, Key Establishment, Wireless Communication.

I. INTRODUÇÃO

A conexão massiva de dispositivos está alinhada com as expectativas para as futuras redes de comunicações móveis, que visam suportar um ecossistema altamente distribuído e interconectado. No entanto, esse aumento exponencial na quantidade de dispositivos conectados amplia significativamente a superfície de ataque cibernética, expondo novas vulnerabilidades que podem ser exploradas por agentes maliciosos.

Conforme definido pelo manual de segurança de computadores do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology*, NIST), a segurança cibernética visa proteger sistemas automatizados para garantir os princípios de confidencialidade, integridade e disponibilidade [1]. Com a evolução tecnológica e o crescimento das ameaças cibernéticas, esse modelo foi expandido para incluir os pilares de autenticidade e irretratibilidade, resultando em um arcabouço mais abrangente e robusto para a segurança da informação em sistemas interconectados [2]. Esses cinco pilares desempenham papéis fundamentais na construção de

comunicações seguras, onde uma implementação eficiente se torna indispensável para atender às crescentes exigências de segurança nas redes móveis [3, 4].

Dentre esses pilares, a confidencialidade se destaca como um aspecto central para a proteção da informação em ambientes conectados, sendo o foco principal deste estudo. A confidencialidade é a garantia de que as informações estejam acessíveis apenas a indivíduos devidamente autorizados, protegendo-as contra acessos ou divulgações não autorizadas [1]. A criptografia dos dados para garantia de confidencialidade depende do estabelecimento de canais seguros para a troca de chaves [2]. Métodos tradicionais, como infraestrutura de chave pública, Diffie-Hellman e Distribuição quântica de chaves (*Quantum Key Distribution*, QKD), garantem segurança, mas possuem alta complexidade computacional e consumo de energia. Essas limitações os tornam inadequados para dispositivos de Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) e aplicações móveis em redes de Quinta Geração de Rede Móvel Celular (5G) e de Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G).

Nesse cenário, a geração de chaves na camada física emerge como uma alternativa promissora [5, 6]. Essa abordagem explora propriedades intrínsecas dos canais de comunicação sem fio, como a reciprocidade e a aleatoriedade dos canais de desvanecimento, para estabelecer chaves criptográficas de forma eficiente. Essa técnica reduz significativamente os requisitos computacionais e o consumo de energia, tornando-se particularmente adequada para aplicações previstas para as redes 5G a Além (*5G and Beyond*, B5G). Este artigo tem como objetivo estudar as principais características do uso das características do canal sem fio como solução para o estabelecimento de chaves criptográficas na camada física de redes B5G.

II. ESTABELECIMENTO DE CHAVES SECRETAS UTILIZANDO O CANAL DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

O estabelecimento de chaves secretas utilizando as características do canal de comunicação sem fio é uma abordagem promissora para garantir a segurança da troca de informações em sistemas distribuídos [6]. Diferentemente dos métodos tradicionais, que dependem de infraestrutura criptográfica complexa, essa técnica explora as variações naturais do canal sem fio para gerar chaves secretas entre dispositivos próximos. A segurança desse método baseia-se na aleatoriedade não determinística do canal sem fio, que gera variações únicas na

propagação do sinal, garantindo que apenas dispositivos fisicamente próximos compartilhem informações coerentes sobre o meio [5]. Essa característica reduz a possibilidade de ataques de terceiros, já que um invasor posicionado fora da região de coerência do canal não conseguirá inferir corretamente os valores das chaves geradas. O processo de geração de chaves a partir das características do canal de comunicação ocorre por meio de diversas etapas fundamentais, descritas a seguir.

A sondagem do canal é a primeira etapa do processo de geração de chaves e tem como objetivo medir as características dinâmicas do canal de comunicação [6]. Essas medições são obtidas por meio da troca de sinais de sondagem entre os dispositivos envolvidos, permitindo a captura de parâmetros como ganho do canal, atenuação e Indicador de Força de Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI) [5]. Esses parâmetros são altamente sensíveis a mudanças no ambiente, garantindo que as chaves geradas sejam exclusivas para dispositivos próximos e impossíveis de prever por um atacante externo.

Após a medição do canal, as partes envolvidas devem identificar e extrair as variações imprevisíveis do meio de transmissão para garantir que a chave gerada seja única e não replicável por um adversário, processo realizado pela etapa de extração de aleatoriedade. Esse processo é essencial para assegurar que a chave final seja resistente a ataques, especialmente aqueles conduzidos por um interceptor posicionado nas proximidades dos dispositivos legítimos [6].

Após a extração da aleatoriedade das medições do canal, os valores contínuos obtidos precisam ser convertidos em representações discretas, através da etapa de quantização, permitindo que os dispositivos legítimos compartilhem uma sequência binária comum, a qual será utilizada como chave secreta [6]. Essa conversão é necessária porque as medições do canal ocorrem no domínio analógico, sendo influenciadas por efeitos como ruído térmico, interferência externa e desvanecimento multipercurso, o que pode resultar em pequenas discrepâncias entre os valores observados pelos dispositivos participantes [5].

Após a extração de aleatoriedade e a quantização das medições do canal, pequenas discrepâncias podem surgir entre as sequências de bits geradas pelos dispositivos legítimos devido a ruído, atenuação do sinal e variações temporais do canal [6]. Como resultado, é necessário um processo de correção que permita alinhar essas sequências entre os dispositivos comunicantes, sem comprometer a segurança da comunicação. Esta etapa é conhecida como reconciliação da informação. Para isso, os dispositivos trocam mensagens auxiliares contendo informações parciais sobre a sequência quantizada, projetadas para permitir a correção de erros sem fornecer dados suficientes para que um interceptador reconstrua a chave secreta. Essa abordagem garante que, ao final do processo, ambos os dispositivos possuam chaves idênticas, garantindo a integridade da comunicação segura.

A amplificação de privacidade é a etapa final no processo de geração de chaves criptográficas baseadas no canal de comunicação e tem como objetivo eliminar qualquer informação parcial que um adversário possa ter obtido durante

as fases anteriores [5]. Algumas informações são transmitidas publicamente no estágio de reconciliação, podendo ser acessadas por um adversário e comprometendo potencialmente a segurança da sequência de chaves. O princípio fundamental dessa técnica consiste na transformação da chave reconciliada em uma nova chave menor e mais segura, eliminando qualquer correlação que um invasor possa explorar, através de métodos matemáticos e criptográficos, como funções de hash universais e códigos de extração de aleatoriedade.

III. MODELO DE SISTEMA PARA A RECONCILIAÇÃO

O modelo de sistema analisado neste estudo é composto por três entidades principais: um ponto de acesso (transmissor) e dois dispositivos receptores (A e B), ambos posicionados próximos entre si e localizados a distâncias similares do transmissor [7] [8]. O processo de estabelecimento de chaves tem início com a transmissão de uma sequência binária de referência X pelo transmissor, a qual é recebida pelos dispositivos A e B por meio do canal de comunicação sem fio.

Após a transmissão do sinal de informação X , cada receptor observa um sinal recebido afetado pelo canal de comunicação e pelo ruído presente no meio, caracterizando um sistema de recepção típico de redes sem fio. O modelo matemático que descreve a recepção do sinal em cada dispositivo pode ser representado por $y_i = h_i * x + n_i$, onde y_i representa o sinal recebido pelo dispositivo i , h_i é a influência do canal de transmissão, caracterizado por modelos de desvanecimento, x é o bit transmitido pelo transmissor, n_i é o Ruído Gaussiano Branco Aditivo (*Additive white Gaussian noise*, AWGN), que representa flutuações aleatórias no sinal recebido, i indica o receptor correspondente (A ou B).

O cenário analisado assume que os dois receptores (A ou B) estão posicionados próximos, implicando que ambos experienciam condições de propagação semelhantes. Como resultado, a envoltória do canal nos dois dispositivos segue a mesma distribuição estatística, com parâmetros de desvanecimento equivalentes devido à correlação espacial. Neste estudo, considera-se um canal de desvanecimento Rayleigh. Além do desvanecimento do canal, os receptores estão sujeitos ao AWGN, cujas componentes n_a e n_b possuem a mesma média e variância. Isso garante que o nível de degradação aleatória do sinal seja estatisticamente equivalente para ambos os dispositivos.

Após a recepção do sinal Y_a em A e Y_b em B , ambos os dispositivos realizam a demodulação do sinal recebido, convertendo-o em sequências binárias quantizadas. Dessa forma, o usuário A detecta uma sequência binária K_a , enquanto o usuário B detecta uma sequência binária K_b . Como resultado das variações introduzidas pelo ruído do canal, as sequências K_a e K_b podem apresentar pequenas diferenças, exigindo a aplicação de mecanismos de reconciliação para garantir que ambas as partes compartilhem uma chave criptográfica idêntica.

No processo de reconciliação da informação, usam-se códigos corretores de erro durante o processo, em que o espaço amostral é composto por todas as possíveis sequências distintas de n bits. O tamanho desse espaço depende do número de bits de informação k em cada sequência, resultando em um

total de 2^k seqüências únicas. Quando o número de bits de informação k é elevado, o espaço amostral cresce exponencialmente, tornando o processo de reconciliação da informação computacionalmente oneroso, pois exigiria a comparação com um grande número de seqüências possíveis. Para mitigar essa complexidade, neste trabalho, optou-se por limitar o espaço amostral a 2^{11} seqüências para valores de $k > 11$. Nessa abordagem, as palavras de informação são selecionadas de forma aleatória dentro do intervalo de 0 a $2^k - 1$, garantindo diversidade nas seqüências e evitando padrões excessivamente ordenados que poderiam comprometer a representatividade do espaço amostral.

Para avaliar a eficiência da reconciliação de chaves criptográficas, foram realizados 10.000 testes em cinco cenários distintos, variando ruído e modelo de desvanecimento do canal. O Cenário 1 considera um canal ideal ($h_i = 1$) sem ruído, enquanto o Cenário 2 mantém o canal ideal, mas introduz baixo ruído. No Cenário 3, o efeito de baixo ruído é acrescido ao modelo de desvanecimento Rayleigh para o canal de comunicação. O Cenário 4 apresenta alto ruído para um canal ideal, e o Cenário 5 combina alto ruído térmico e desvanecimento Rayleigh, resultando na maior degradação do sinal.

IV. ANÁLISE DO MÉTODO DE RECONCILIAÇÃO [7]

Nesta seção, o método de reconciliação de informação apresentado baseia-se na técnica descrita no artigo "ProxiMate: Proximity-based Secure Pairing using Ambient Wireless Signals" [7].

No cenário considerado, os usuários A e B recebem sinais transmitidos pelo emissor, os quais são processados para gerar seqüências binárias quantizadas K_a e K_b , respectivamente. Como os dispositivos estão posicionados próximos, as seqüências K_a e K_b podem ser interpretadas como versões distorcidas de uma mesma palavra-código de n bits, sendo possíveis de correção por meio de uma função corretora de erros $f_c(\cdot)$. Dessa forma, para garantir que ambos compartilhem a mesma chave, o usuário A gera uma seqüência auxiliar P , dependente de K_a e da função $f_c(\cdot)$, e a transmite para o usuário B . Com base em K_b e na mesma função de codificação $f_c(\cdot)$, o usuário B consegue reconstruir K_a , garantindo que ambos possuam a mesma chave secreta.

Neste modelo, o usuário A aplica a função de codificação $f_c(\cdot)$ sobre sua seqüência K_a , obtendo a palavra-código mais próxima dentro do espaço amostral do código corretor de erro. Em outras palavras, a função de codificação $f_c(K_a)$ é definida como a palavra-código dentro do espaço amostral do código corretor de erro que apresenta a menor distância de Hamming (diferença bit a bit) em relação a K_a . Em seguida, a seqüência auxiliar P , que será transmitida do usuário A para B , é definida como $P = K_a - f_c(K_a)$, onde P representa a diferença bit a bit entre K_a e a palavra-código $f_c(K_a)$ gerada pela função corretora de erro. Assume-se um canal de comunicação ideal entre A e B , dado que os dispositivos estão próximos e sujeitos a condições ambientais similares. Assim, ao receber P , o usuário B realiza a seguinte operação

$$P + f_c(K_b - P) = P + f_c(K_a) \rightarrow K_a. \quad (1)$$

Como resultado, mesmo que K_b contenha pequenos erros em relação a K_a , a função corretora de erro $f_c(\cdot)$ é capaz de mapear $K_b - P$ para a palavra-código mais próxima, garantindo que B obtenha K_a com alta probabilidade. Esse mecanismo é eficiente para corrigir pequenas discrepâncias introduzidas pelo ruído do canal.

Ao final da etapa de reconciliação, tanto o usuário A quanto o usuário B possuem a mesma chave secreta K_a , possibilitando a estabelecimento de um canal seguro para troca de informações confidenciais entre eles. A Figura 1 ilustra este processo. Na subseções seguintes são apresentados resultados numéricos sobre a eficiência do método de reconciliação considerando os códigos corretores de erro Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) e Low-Density Parity-Check (LDPC), avaliando o desempenho do sistema sob variadas condições de canal e níveis de ruído, conforme descrito na Seção III.

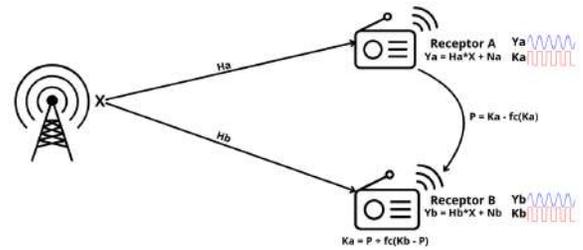


Fig. 1. Modelo de Sistema para reconciliação de Chaves Criptográficas [7]

A. BCH

Nesta subseção, avalia-se a eficiência do estabelecimento de chaves criptográficas nos dispositivos A e B utilizando o método de reconciliação previamente apresentado, considerando o código corretor de erro BCH, em que as palavra-códigos são compostas por n bits, com k bits de informação.

a.1) Para seqüências de 7 bits

No caso das seqüências de 7 bits ($n = 7$), a configuração utilizada apresenta 4 bits de informação ($k = 4$) e 3 bits de paridade. Devido ao tamanho relativamente reduzido da seqüência, é possível enumerar todo o espaço amostral, cujo tamanho é dado por 2^k , resultando em 16 seqüências distintas.

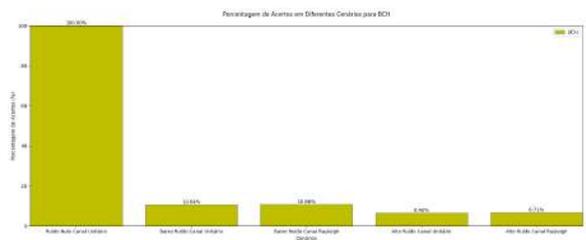


Fig. 2. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma seqüência de 7 Bits

A Figura 2 ilustra as probabilidades de sucesso no estabelecimento da chave para os diferentes cenários avaliados. Diferentemente de outras seqüências codificadas com BCH, a configuração de 7 bits possui apenas uma possibilidade para k , o que restringe a flexibilidade na escolha do tamanho da seqüência. Essa limitação pode comprometer a eficiência do processo de reconciliação, pois impede ajustes para otimizar a

robustez do código frente às condições do canal. Esses resultados mostram que, mesmo em condições de baixo ruído e sem considerar os efeitos do desvanecimento, as taxas de sucesso no estabelecimento de chaves foram limitadas. Em cenários com ruído elevado, essa taxa foi ainda mais reduzida, evidenciando a vulnerabilidade do método para sequências curtas. Portanto, para aumentar a confiabilidade do processo de reconciliação, é essencial utilizar sequências de maior comprimento, o que proporciona maior aleatoriedade do espaço amostral e melhora a resiliência contra erros de transmissão.

a.2) Para sequências de 255 bits

Para sequências de 255 bits codificadas com BCH, foram realizados testes considerando duas configurações: 123 bits de informação ($k = 123$), uma opção intermediária em relação ao total de bits da sequência, e 247 bits de informação ($k = 247$), a configuração com a menor quantidade de bits de paridade possível. Em ambos os casos, considerou-se o espaço amostral reduzido para 2^{11} sequências, permitindo a avaliação dos cenários sem comprometer a viabilidade do experimento.

Conforme ilustrado na Figura 3, para a configuração com 123 bits de informação.

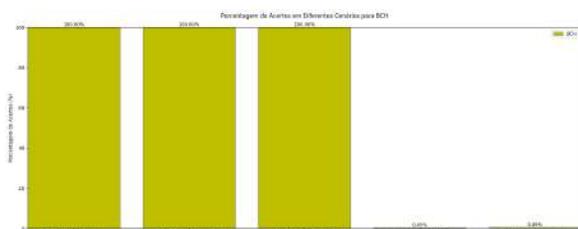


Fig. 3. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com 123 bits de informação

Para a configuração com 247 bits de informação, os resultados seguiram um padrão semelhante, como ilustrado na Figura 4.

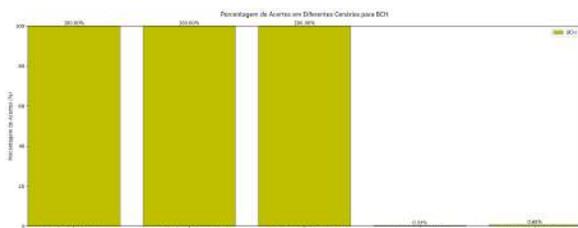


Fig. 4. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com 247 bits de informação

Esses resultados indicam que, independentemente da quantidade de bits de paridade presentes na palavra-código, a probabilidade de estabelecimento da chave criptográfica se mantém elevada em condições de baixo ruído. No entanto, à medida que o ruído e o desvanecimento aumentam, a escolha do número de bits de informação influencia diretamente a robustez da chave gerada. Notavelmente, o aumento no número de bits de informação em uma sequência de 255 bits não compromete significativamente a taxa de sucesso em cenários adversos, sugerindo que a configuração com maior k pode ser preferida, pois maximiza a taxa de informação sem uma penalização expressiva na probabilidade de estabelecimento da chave.

B. LDPC

Os códigos LDPC são definidos por dois parâmetros estruturais principais: o grau de variável (d_v) e o grau de verificação (d_c). Esses parâmetros influenciam diretamente a configuração da sequência de k bits e os resultados obtidos nos testes de reconciliação. Para que um código LDPC funcione corretamente, é necessário que o grau de verificação seja um divisor do tamanho da palavra-código n , enquanto o grau de variável deve ser maior que 2 e menor que o grau de verificação.

b.1) Para sequências de 7 bits

Para sequências com comprimento de 7 bits e como 7 é um número primo, a única escolha viável para satisfazer a restrição do grau de verificação é utilizar $d_c = 7$, ou seja, igual ao valor de n . Consequentemente, o grau de variável foi definido como $d_v = 6$. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para essa configuração.

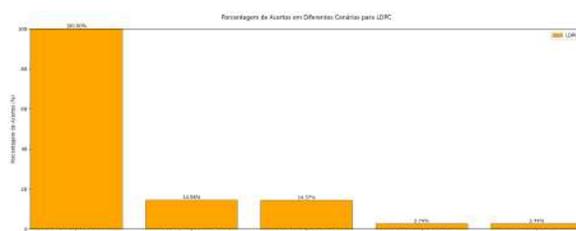


Fig. 5. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 7 Bits

Esses resultados seguem um comportamento semelhante ao observado para sequências de 7 bits no códigos BCH A baixa taxa de sucesso nos cenários mais desafiadores reforça a limitação do uso de sequências curtas.

b.2) Para sequências de 255 bits

Diferentemente do caso de 7 bits, o número 255 não é primo, permitindo a escolha de diferentes valores para o grau de verificação (d_c). Assim, foram realizados dois testes para sequências de 255 bits, variando os graus de verificação e de variável das seguintes maneiras: (i) menor grau de verificação ($d_c = 5$) e menor grau de variável ($d_v = 3$); e (ii) maior grau de verificação ($d_c = 255$) e maior grau de variável ($d_v = 254$). Os resultados obtidos para cada configuração estão apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

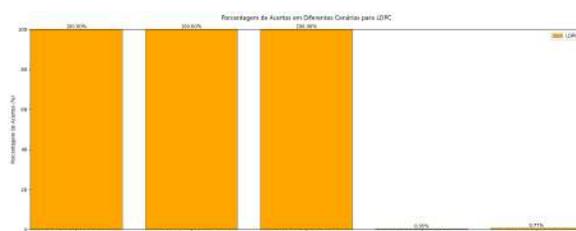


Fig. 6. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com $d_c = 5$ e $d_v = 3$

Os resultados indicam que, para sequências de 255 bits, os valores do grau de verificação e do grau de variável tornam-se irrelevantes para o estabelecimento da chave. Isso ocorre porque, com o aumento do tamanho da sequência, a influência

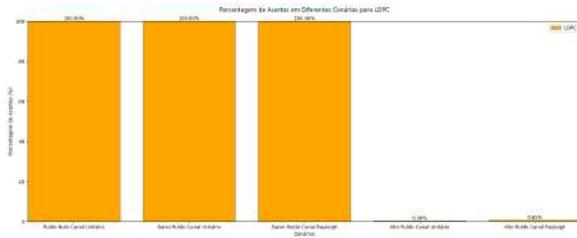


Fig. 7. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com $d_c = 255$ e $d_v = 254$

dos parâmetros estruturais do código LDPC é minimizada em relação ao efeito do ruído e da interferência no canal.

V. ANÁLISE DO MÉTODO DE RECONCILIAÇÃO [8]

Nesta seção, o método de reconciliação de informação apresentado segue a abordagem descrita no artigo "Wireless Channel Key Generation for Multi-User Access Scenarios." [8]. O processo de estabelecimento de chaves criptográficas nesse contexto também emprega códigos corretores de erros, para corrigir discrepâncias entre as sequências binárias extraídas pelos dispositivos legítimos.

A reconciliação começa com o dispositivo A selecionando aleatoriamente uma palavra-código c de n bits do conjunto do espaço amostral do código corretor de erro. Em seguida, essa palavra-código é combinada com a chave K_a , gerada localmente pelo dispositivo A através do processo de quantização, utilizando a operação XOR (\oplus), resultando na sequência s tal como $s = K_a \oplus c$. A sequência resultante dessa operação é transmitida para o dispositivo B . Ao receber s , o dispositivo B realiza a operação XOR entre s e sua própria chave gerada localmente, K_b , obtendo uma versão potencialmente corrompida da palavra-código original, sendo $c_b = s \oplus K_b$. Se a distância de Hamming entre c_b e c estiver dentro da capacidade de correção do código corretor, o dispositivo B poderá decodificar c_b corretamente para obter c . Com isso, ele consegue recuperar a chave original K_a realizando a seguinte operação

$$K_b = s \oplus c \rightarrow K_a. \quad (2)$$

Dessa forma, o dispositivo B tende a reconstruir a mesma chave gerada pelo dispositivo A , garantindo que ambos compartilhem K_a como a chave secreta comum para comunicação segura [8].

Este método de reconciliação baseado em códigos corretores de erros pode falhar quando há uma taxa de erro excessiva entre as chaves geradas pelos dispositivos legítimos, seja devido a alta interferência, quantização imprecisa, ruído impulsivo, assimetria do canal ou ataques ativos. De fato, o método assume que a distância de Hamming entre K_a e K_b está dentro da capacidade de correção do código.

A Figura 8 ilustra o processo de reconciliação adotado no estudo de [8]. A seguir, são apresentados os resultados numéricos obtidos com esse método, analisando seu impacto na taxa de geração de chaves seguras e na eficiência da correção de erros, seguindo a mesma abordagem utilizada na Seção IV na comparação dos desempenhos.

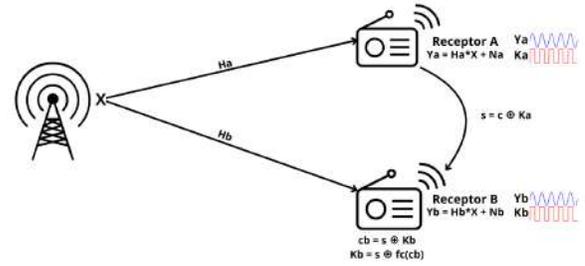


Fig. 8. Modelo de Sistema para reconciliação de Chaves Criptográficas [8]

A. BCH

As características das sequências codificadas com BCH neste modelo de reconciliação são as mesmas descritas na Seção III e utilizadas na análise anterior da Seção IV.

a.1) Para sequências de 7 bits

Os resultados obtidos para sequências de 7 bits utilizando BCH são apresentados na Figura 9.

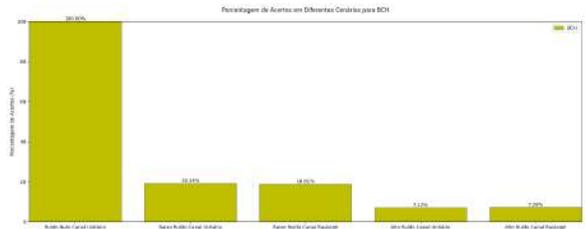


Fig. 9. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 7 Bits

Comparando com o modelo de reconciliação anterior, observa-se um leve aumento na taxa de sucesso, mantendo o mesmo comportamento esperado para diferentes condições do canal.

a.2) Para sequências de 255 bits

Os testes com 255 bits e 123 bits de informação, apresentaram os resultados conforme ilustrado na Figura 10.

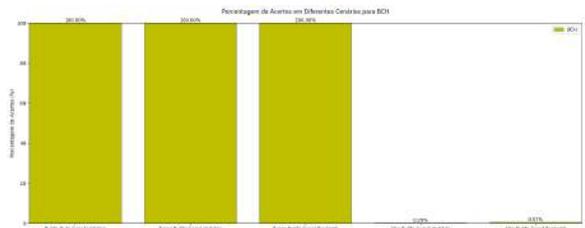


Fig. 10. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com 123 bits de informação

Já para 255 bits e 247 bits de informação, os valores foram similares, conforme visto na Figura 11.

Os resultados, juntamente com os apresentados nas Figuras 3 e 4, indicam que o aumento do tamanho da sequência (n) tem um impacto maior na taxa de sucesso do que o aumento da paridade. Isso sugere que, a partir de um certo ponto, a redundância adicional proporcionada pelos bits de paridade deixa de ser um fator relevante para a melhoria dos resultados.

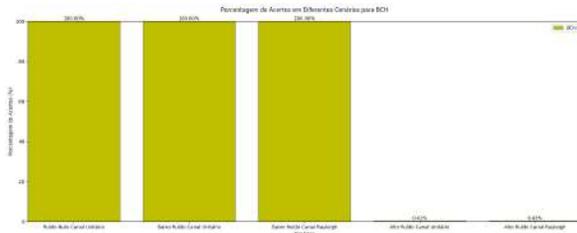


Fig. 11. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com 247 bits de informação

B. LDPC

Os resultados a seguir analisam o desempenho do código LDPC para diferentes tamanhos de sequência, no processo de reconciliação apresentado em [8]. Os parâmetros de grau de verificação (d_c) e grau de variável (d_v) adotados para este modelo de reconciliação são os mesmos utilizados na Seção IV.

b.1) Para sequências de 7 bits

A Figura 12 apresenta os resultados obtidos para sequências de 7 bits utilizando LDPC.

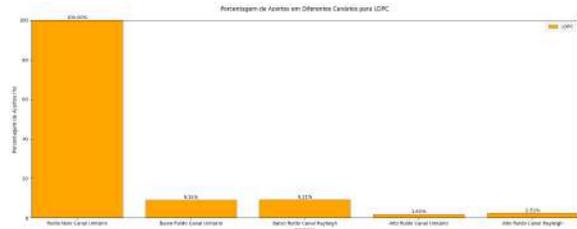


Fig. 12. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 7 Bits

Embora os resultados em cenários de baixo ruído apresentem uma leve queda em relação ao modelo anterior, o comportamento geral permaneceu semelhante, indicando que a taxa de sucesso é maior nessas condições e reduz-se significativamente com o aumento da interferência.

b.2) Para sequências de 255 bits

Os testes com 255 bits e menor grau de verificação e variável, $d_c = 5$ e $d_v = 3$ são reportados na Figura 13.

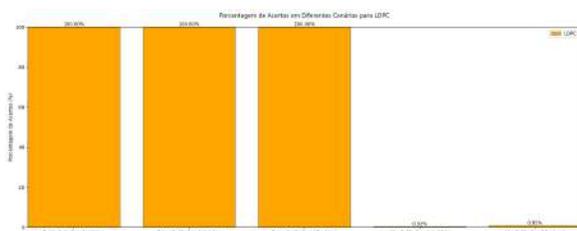


Fig. 13. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com $d_c = 5$ e $d_v = 3$.

Com maior grau de verificação ($d_c = 255$) e maior grau de variável ($d_v = 254$), as taxas de sucesso permaneceram estáveis, conforme apresentados na Figura 14.

Tanto os resultados obtidos neste modelo de reconciliação quanto o abordado na Seção IV indicam que o tamanho da sequência tem um impacto significativamente maior na taxa de sucesso do que os valores de d_c e d_v . Essa tendência fica evidente nas sequências de 255 bits, onde a taxa de

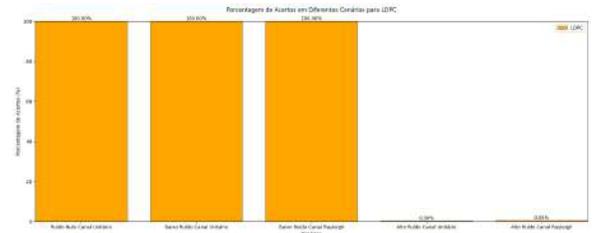


Fig. 14. Probabilidade do receptor B gerar K_a , para uma sequência de 255 Bits com $d_c = 255$ e $d_v = 254$.

sucesso se mantém em 100% independentemente da escolha dos parâmetros de verificação e variável.

VI. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a viabilidade do uso das propriedades físicas do canal sem fio para o estabelecimento de chaves criptográficas em redes 5G. A abordagem proposta reduz a necessidade de mecanismos complexos de distribuição de chaves, explorando a aleatoriedade e reciprocidade do canal. Foram avaliados métodos de reconciliação com diferentes códigos corretores de erro e cenários de propagação, demonstrando que sequências mais longas e códigos eficientes melhoram a taxa de sucesso na geração das chaves. Com base nesses achados, recomenda-se o desenvolvimento de soluções adaptativas para aprimorar a confiabilidade e a segurança do estabelecimento de chaves em redes sem fio emergentes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FINATEL.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Nieves, K. Dempsey e V. Pillitteri. “An Introduction to Information Security”. Em: *NIST Special Publication* (2017).
- [2] William Stallings. *Criptografia e Segurança de Redes. Princípios e Práticas*. 2006.
- [3] M. B. Gracia et al. “6G Security Challenges and Opportunities”. Em: *IEEE 13th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*. 2022.
- [4] K. Kaur e K. T. Joseph. “Security Challenges and Solutions in 5G Networks”. Em: *IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*. 2024.
- [5] T. Wang, Y. Liu e A. Vasilakos. “Survey on Channel Reciprocity Based Key Establishment Techniques for Wireless Systems”. Em: *Wireless Networks* (2015).
- [6] J. Zhang et al. “Key Generation From Wireless Channels: A Review”. Em: *IEEE Access* (2016).
- [7] S. Mathur et al. “Proximate: Proximity-based Secure Pairing using Ambient Wireless Signals”. Em: *9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. 2011.
- [8] X. Yuan et al. “Wireless Channel Key Generation for Multi-User Access Scenarios”. Em: *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. 2022.

Otimização da Energia Coletada por Dispositivos IoT em Sistemas WET

Natália Pereira Batista e Victoria Dala Pegorara Souto
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
natalia.batista@gec.inatel.br, victoria.souto@inatel.br

Abstract—The wireless energy transfer (WET) technology is essential for future Internet of Things (IoT) networks, as it can enable the uninterrupted and maintenance-free operation of a massive number of IoT devices. However, acquiring channel state information (CSI) is crucial for designing optimal beamforming at the power beacon (PB) and determining the ideal PB placement in the system. Nevertheless, this knowledge is not available in most practical WET systems. Therefore, in this work, we propose a novel numerical approach to maximize the total energy harvested by IoT devices in WET systems by defining the suboptimal PB placement based solely on statistical CSI (SCSI) knowledge. From the obtained results, we demonstrate that the proposed solution increases the total energy harvested by IoT devices by up to 74% compared to a WET system with random PB placement.

Index Terms—Beamforming, Internet das Coisas, Transferência de Energia Sem Fio.

Resumo—A tecnologia de transferência de energia sem fio (WET, do inglês *Wireless Energy Transfer*) é essencial para as futuras redes de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*), pois pode permitir a operação ininterrupta e sem manutenção de um número massivo de dispositivos IoT. No entanto, a aquisição das informações do estado de canal (CSI, do inglês *Channel State Information*) é fundamental para realizar o projeto ótimo do *beamforming* no *power beacon* (PB) e determinar o posicionamento ideal dos PBs no sistema. No entanto, esse conhecimento não está disponível na maioria dos sistemas WET práticos. Portanto, neste trabalho, propomos uma nova abordagem numérica para maximizar a energia total coletada pelos dispositivos IoT em sistemas WET a partir da definição da posição subótima do posicionamento do PB considerando apenas o conhecimento estatístico do CSI (SCSI, do inglês *Statistical CSI*). A partir dos resultados obtidos, demonstramos que a solução proposta aumenta em até 74% a energia total coletada pelos dispositivos IoT quando comparada ao sistema WET com posicionamento do PB aleatório.

Palavras chave—Beamforming, Internet das coisas (IoT), Transmissão de energia sem fio.

I. INTRODUÇÃO

A crescente diversificação das aplicações envolvendo dispositivos de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) tem se destacado nos últimos anos, acompanhada pelo aumento significativo na quantidade desses dispositivos. No entanto, para assegurar seu funcionamento contínuo, é essencial o uso de baterias ou a conexão a uma fonte de energia fixa por meio de cabos [1, 2]. Essa dependência impõe desafios consideráveis no que tange ao fornecimento de energia de forma confiável e economicamente viável, uma vez que as soluções atuais baseadas em baterias ou alimentação por fio apresentam elevados custos e impactos ambientais significativos, além de se tornarem impraticáveis em implantações de larga escala e locais de difícil acesso [1, 3, 4]. Diante desse cenário, torna-

se imprescindível o desenvolvimento de sistemas sustentáveis para transferência de energia, viabilizando a implementação das futuras redes IoT em larga escala.

Isso motivou o estudo e o desenvolvimento de tecnologias de Transferência de Energia Sem Fio (WET, do inglês *Wireless Energy Transfer*) por radiofrequência (RF). WET é considerada uma solução economicamente viável e sustentável para as futuras redes IoT. Essa tecnologia se baseia em sinais de radiofrequência (RF) e evita a manutenção e troca de baterias em ambientes adversos [1]. Apesar de suas vantagens, o desenvolvimento completo dessa tecnologia está em estágio inicial e, conseqüentemente, apresenta diversos desafios. Um desses desafios é o alcance reduzido dos *power beacons*, o que limita a aplicabilidade de sistemas WET em cenários reais. Para superar essa limitação, novas soluções para projeto de *beamforming* no PB têm sido desenvolvidas [5, 6, 7, 8, 9, 10], visto que o uso de múltiplas antenas no PB permite que o feixe de energia aponte para a direção desejada, ampliando, assim, seu alcance. Outro desafio para cenários práticos é a aquisição da informação do estado do canal (CSI, do inglês *Chanel State Information*), usada para projeto ótimo do *beamforming* no PB [11, 12].

Além do projeto de *beamforming* no PB, a definição do posicionamento ideal dos PBs representa outro desafio fundamental nos sistemas WET. Diante disso, diversas soluções emergentes têm sido recentemente propostas para otimizar a disposição desses dispositivos [13, 14, 15]. Especificamente, em [13], os autores investigam novas estratégias de posicionamento de PBs em cenários nos quais tanto a localização dos sensores quanto o CSI são desconhecidos. Nessas estratégias, os PBs, que irradiam energia omnidirecionalmente, são posicionados de forma estratégica para maximizar a energia mínima média recebida em toda a área de cobertura. Além disso, no estudo apresentado em [14], os autores empregam a técnica *Daubechies Wavelet* para determinar as posições ideais de carregadores sem fio em redes de sensores recarregáveis. Por fim, em [15], é proposta uma abordagem inovadora para maximizar a quantidade de energia efetivamente transferida para os dispositivos IoT dentro de uma área de cobertura específica, por meio da otimização do posicionamento e da orientação de PBs direcionais.

Motivados pelos desafios previamente apresentados, este trabalho investiga a otimização do posicionamento de PBs em sistemas WET visando maximizar a energia total coletada pelos dispositivos IoT, considerando uma restrição mínima de energia por dispositivo. Além disso, diferentemente de [13, 14, 15], devido à complexidade do hardware e à limitação do

consumo de energia dos PBs, consideramos uma arquitetura de *beamforming* analógico e projetamos o *beamforming* no PB com base apenas no conhecimento estatístico do CSI (SCSI, do inglês *Statistical CSI*). Portanto, a principal contribuição deste trabalho é determinar numericamente a posição subótima do PB em um sistema WET considerando apenas o conhecimento do SCSI.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta o modelo do sistema e o problema de otimização proposto. A Seção III apresenta a solução proposta para maximizar a energia total coletada pelos dispositivos IoT. A Seção IV apresenta e discute os resultados numéricos obtidos pela solução proposta. Finalmente, a Seção V conclui o artigo e dá orientações para trabalhos futuros.

Notação: Letras minúsculas em itálico como a denotam variáveis, letras minúsculas em negrito \mathbf{a} representam vetores e a_k representa o k -ésimo elemento do vetor \mathbf{a} . Além disso, $(\cdot)^T$ é o transposto, $(\cdot)^H$ denota o transposto conjugado, $|\cdot|$ é o valor absoluto e $\|\cdot\|$ é a norma.

II. MODELO DO SISTEMA

Neste trabalho, foi considerado um sistema composto de um PB equipado com um arranjo uniforme linear (ULA, do inglês *Uniform Linear Array*) com N antenas e K dispositivos IoT equipados com uma única antena. Uma vez que o *beamforming* analógico do canal é utilizado, apenas um feixe é gerado, de modo que o carregamento dos dispositivos é independente. Assumindo o PB na posição $(x_{\text{PB}}, y_{\text{PB}}, z_{\text{PB}})$ e o k -ésimo dispositivo IoT na posição $(x_k, y_k, 0)$ com $k \in \{1, \dots, K\}$. Logo, o sinal recebido pelo k -ésimo dispositivo é dado por [16]

$$y_k = \sqrt{\beta_k} \Theta_k \mathbf{h}_k^H s_k \quad (1)$$

em que $\Theta_k = [\theta_{k,0}, \theta_{k,1}, \dots, \theta_{k,N-1}] \in \mathbb{C}^{1 \times N}$, s_k denota o sinal transmitido definido por uma variável aleatória Gaussiana independente com média zero e variância unitária. Além disso, β_k é o ganho médio de potência entre o k -ésimo dispositivo IoT e o PB, e é definido por [16]

$$\beta_k = \frac{\lambda^2}{16\pi^2} d_k^{-\alpha_k} \quad (2)$$

em que $\lambda = \frac{c}{f}$ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz, f é a frequência da portadora, α_k é o expoente de perda de percurso, e d_k denota a distância entre o PB e o k -ésimo dispositivo. Por fim, $\mathbf{h}_k^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ é o vetor de canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT e é dado por [17]

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\frac{\kappa_k}{1 + \kappa_k}} \bar{\mathbf{h}}_k + \sqrt{\frac{1}{1 + \kappa_k}} \tilde{\mathbf{h}}_k \quad (3)$$

em que κ_k é o fator de Rice, $\bar{\mathbf{h}}_k$ representa os componentes de linha de visada (LoS, do inglês *Line-of-sight*) do vetor de canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT e $\tilde{\mathbf{h}}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ denota os componentes sem LoS (NLoS, do inglês *Non-line-of-sight*) do vetor de canal entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT e é modelado considerando a distribuição Rayleigh. Logo, a potência de RF recebida pelo k -ésimo dispositivo é

$$P_k = \beta_k |\Theta_k \mathbf{h}_k^H|^2 \quad (4)$$

A energia coletada pelo k -ésimo dispositivo é dada por

$$E_k = \tau_k \left\{ \frac{\mu - \mu \Omega [1 + e^{-a(P_k - b)}]}{1 - \Omega} \right\} \quad (5)$$

em que $\Omega = \frac{1}{1 + e^{ab}}$ é uma constante que garante entrada/saída zero, a e b são constantes relacionadas às especificações do circuito de coleta de energia e μ é a potência máxima coletada pelo dispositivo IoT quando o circuito do dispositivo está saturado. Vale ressaltar que, nesse trabalho, consideramos a energia coletada em um tempo de coerência (T_c), ou seja, $\tau_k = T_c \forall k$, no qual o canal pode ser considerado estático.

A. Problema de Otimização Proposto

O principal objetivo deste trabalho é maximizar a energia total coletada pelos dispositivos IoT ($E_T = \sum_{k=1}^K E_k$), garantindo que as restrições de energia mínima de cada dispositivo IoT, restrições de posicionamento do PB e da arquitetura de *beamforming* analógico sejam atendidas. Portanto, o problema de otimização proposto é definido como

$$\begin{aligned} \max_{\{\Theta\}, \{\mathbf{P}\}} \quad & E_T = \sum_{k=1}^K E_k \\ \text{sujeito à} \quad & E_k \geq E_{\min} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, \\ & |\theta_{k,n}|^2 = \frac{P_T}{N} \quad \forall n \in \{1, \dots, N\} \\ & 0 \leq x_{\text{PB}} \leq x_{\max}, \\ & 0 \leq y_{\text{PB}} \leq y_{\max}, \\ & z_{\min} \leq z_{\text{PB}} \leq z_{\max}, \end{aligned} \quad (6)$$

em que $\mathbf{P} = [x_{\text{PB}}, y_{\text{PB}}, z_{\text{PB}}]$ denota a posição do PB, E_{\min} é a restrição de energia mínima dos dispositivos IoT, x_{\max} , y_{\max} , z_{\max} e z_{\min} denotam as restrições de posicionamento do PB, e $|\theta_{k,n}|^2 = \frac{P_T}{N}$ denota a restrição de ganho constante no PB considerando a arquitetura de *beamforming* analógico.

III. SOLUÇÃO PROPOSTA

Conforme pode ser verificado, para determinar a solução ótima de (6) é necessário o conhecimento perfeito da CSI no PB, o que é inviável para sistemas WET em cenários reais. Logo, nesse trabalho, uma solução sub-ótima é proposta, considerando o projeto do *beamforming* analógico no PB baseado apenas no conhecimento de $\bar{\mathbf{h}}_k$, ou seja, apenas a SCSI é conhecida no PB. Neste caso, Θ_k^* pode ser computado a partir da estratégia *Equal Gain Combining* (EGC) e é dado por

$$\Theta_k^* = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \left[\frac{\mathbf{h}_{k,1}}{|\mathbf{h}_{k,1}|}, \frac{\mathbf{h}_{k,2}}{|\mathbf{h}_{k,2}|}, \dots, \frac{\mathbf{h}_{k,N}}{|\mathbf{h}_{k,N}|} \right] \quad (7)$$

Portanto, substituindo (7) em (6), o problema de otimização proposto pode ser reescrito como

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{P}\}} \quad & E_T = \sum_{k=1}^K E_k \\ \text{subject to} \quad & E_k \geq E_{\min} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, \\ & 0 \leq x_{\text{PB}} \leq x_{\max}, \\ & 0 \leq y_{\text{PB}} \leq y_{\max}, \\ & z_{\min} \leq z_{\text{PB}} \leq z_{\max}. \end{aligned} \quad (8)$$

Analisando as restrições do problema proposto, conclui-se que se trata de um problema de otimização não convexo, logo, não há método padrão para resolvê-lo. Por conseguinte, neste artigo, inicialmente propõe-se a linearização do problema utilizando o método iterativo de Newton-Raphson a fim de se obter uma solução sub-ótima. Especificamente, considerando a distância entre o PB e o k -ésimo dispositivo IoT é definida como $d_k = \sqrt{(x_{PB} - x_k)^2 + (y_{PB} - y_k)^2 + z_{PB}^2}$ e assumindo que todos os dispositivos atendem à restrição de energia mínima E_{\min} , ou seja

$$E_k = \tau_k \left\{ \frac{\mu - \mu\Omega[1 + e^{-a(P_k - b)}]}{1 - \Omega} \right\} = E_{\min} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}. \quad (9)$$

Considerando $\tau_k = T_c = 1s$ e manipulando a equação acima, temos

$$-a(P_k - b) = \ln \frac{\mu - E_{\min}(1 - \Omega) - \mu\Omega}{\mu\Omega} = F_k \quad (10)$$

Assumindo F_k como uma constante e substituindo (4) em (10), temos

$$\beta_k |\Theta_k \mathbf{h}_k^H|^2 = \frac{ab - F_k}{a} \quad (11)$$

Substituindo (2) e d_k em (11), temos

$$[(x_{PB} - x_k)^2 + (y_{PB} - y_k)^2 + z_{PB}^2]^{-\alpha/2} = \frac{(ab - F_k)16\pi^2}{a\lambda^2 |\Theta_k \mathbf{h}_k^H|^2} = G_k \quad (12)$$

Sabendo que F_k, G_k, C_k são constantes, podemos reescrever (12) como

$$(x_{PB} - x_k)^2 + (y_{PB} - y_k)^2 + z_{PB}^2 = G_k^{-2/\alpha} = C_k \quad (13)$$

Portanto, o problema de otimização em (8), pode ser representado através de um sistema não-linear de K equações definido por

$$\begin{cases} f_1(x, y) = (x_{PB} - x_1)^2 + (y_{PB} - y_1)^2 + z_{PB}^2 - C_1 = 0 \\ f_2(x, y) = (x_{PB} - x_2)^2 + (y_{PB} - y_2)^2 + z_{PB}^2 - C_2 = 0 \\ \vdots \\ f_K(x, y) = (x_{PB} - x_K)^2 + (y_{PB} - y_K)^2 + z_{PB}^2 - C_K = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Para resolver o sistema (14), inicialmente foi realizada a linearização do sistema a partir do Método numérico de *Newton-Raphson* o qual é amplamente utilizado para aproximar soluções e encontrar raízes de equações [18]. Especificamente, se a estimativa inicial da raiz é w_i , uma tangente pode ser traçada do ponto $[w_i, g(w_i)]$. O ponto onde a tangente intersepta o eixo w representa uma estimativa melhorada da raiz. O método de *Newton-Raphson* pode ser derivado da sua interpretação geométrica. Dado um sistema de L equações e T variáveis, a l -ésima equação pode ser linearizada utilizando a versão do método de *Newton-Raphson* para múltiplas variáveis dado por

$$g_l(\mathbf{x}) = g_l(\mathbf{w}_0) + \sum_{j=1}^T \frac{\partial g_l(w_0)}{\partial w_j} (w_j - w_{0,j}), \quad (15)$$

em que $\mathbf{w}_0 = [w_{0,1}, \dots, w_{0,T}]^T$ é o ponto inicial do algoritmo.

Aplicando o método de *Newton-Raphson* para múltiplas variáveis, podemos linearizar o sistema de equações em (14). Uma vez que este método exige a definição de um ponto inicial para garantir a sua convergência, neste trabalho, foi considerado como ponto inicial (x_{PB}, y_{PB}) a média aritmética das coordenadas (x_k, y_k) dos dispositivos. Para a coordenada z_{PB} foi utilizado o valor z_{\min} . Portanto, escrevendo o sistema na forma matricial, temos $\mathbf{A}\mathbf{x}_{i+1} = -\mathbf{f}_i + \mathbf{A}\mathbf{x}_i$, sendo $k \in \{1, \dots, K\}$ referente ao k -ésimo dispositivo. Os índices i representam os valores da iteração anterior e os índices $i+1$ os valores na iteração atual.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_{PB}} & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial y_{PB}} & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial z_{PB}} \\ \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_{PB}} & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial y_{PB}} & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial z_{PB}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{K,i}}{\partial x_{PB}} & \frac{\partial f_{K,i}}{\partial y_{PB}} & \frac{\partial f_{K,i}}{\partial z_{PB}} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_{i+1} = \begin{bmatrix} x_{PB_{i+1}} \\ y_{PB_{i+1}} \\ z_{PB_{i+1}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} x_{PB_i} \\ y_{PB_i} \\ z_{PB_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} f_{1,i} \\ f_{2,i} \\ \vdots \\ f_{K,i} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

em que $f_{k,i}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, x_{PB_i}, y_{PB_i} , e z_{PB_i} denotam os valores na iteração anterior e $x_{PB_{i+1}}, y_{PB_{i+1}}, z_{PB_{i+1}}$ são as variáveis, ou seja, os valores a serem calculados na iteração atual. Adotando $\mathbf{b} = -\mathbf{f}_i + \mathbf{A}\mathbf{x}_i$, pode-se escrever o sistema

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (18)$$

o qual é sobredeterminado e, portanto, não há solução exata. Isso se deve ao fato de \mathbf{b} não pertencer ao espaço coluna de \mathbf{A} , denotado por $C(\mathbf{A})$. Desse modo, o sistema é inconsistente e possui apenas uma solução aproximada, denotada por $\hat{\mathbf{x}}$. O vetor de erro é dado por

$$\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} \quad (19)$$

Além disso, $\mathbf{p} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$ denota a projeção de \mathbf{b} em $C(\mathbf{A})$. Sabe-se que os espaços vetoriais $C(\mathbf{A})$ e $N(\mathbf{A}^T)$ (denominado espaço conulo de \mathbf{A}) são ortogonais. Uma vez que \mathbf{p} está em $C(\mathbf{A})$ e \mathbf{e} é perpendicular a \mathbf{p} , o vetor de erro deve estar no espaço em $N(\mathbf{A}^T)$. Uma vez que os dois vetores são perpendiculares, seu produto escalar é zero e as equações normais (21) podem ser escritas como

$$\mathbf{A}^T(\mathbf{b} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0}, \quad (20)$$

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T\mathbf{b}. \quad (21)$$

Portanto, a solução $\hat{\mathbf{x}}$ minimiza o erro $\|\mathbf{e}\|$. Este método, chamado de Mínimos Quadrados [19], resulta em um sistema de duas equações e duas variáveis dado por

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{PB_{i+1}} \\ \hat{y}_{PB_{i+1}} \\ \hat{z}_{PB_{i+1}} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

em que $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ e \mathbf{b} podem ser escritos como

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_{PB}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_{PB}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f_{K,i}}{\partial x_{PB}}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial f_{1,i}}{\partial y_{PB}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{2,i}}{\partial y_{PB}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f_{K,i}}{\partial y_{PB}}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial f_{1,i}}{\partial z_{PB}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{2,i}}{\partial z_{PB}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f_{K,i}}{\partial z_{PB}}\right)^2 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_K \end{bmatrix}, \quad (24)$$

em que $b_k = \frac{\partial f_{k,i}}{\partial x_{PB}} x_{PB_i} + \frac{\partial f_{k,i}}{\partial y_{PB}} y_{PB_i} - f_{k,i}$. Assim,

$$\mathbf{A}^T \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_{PB}} b_1 + \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_{PB}} b_2 + \dots + \frac{\partial f_{K,i}}{\partial x_{PB}} b_K \\ \frac{\partial f_{1,i}}{\partial y_{PB}} b_1 + \frac{\partial f_{2,i}}{\partial y_{PB}} b_2 + \dots + \frac{\partial f_{K,i}}{\partial y_{PB}} b_K \\ \frac{\partial f_{1,i}}{\partial z_{PB}} b_1 + \frac{\partial f_{2,i}}{\partial z_{PB}} b_2 + \dots + \frac{\partial f_{K,i}}{\partial z_{PB}} b_K \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Representando $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ como $\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$, pode-se escrever o seguinte sistema linear

$$\begin{cases} a_1 \hat{x}_{PB_{i+1}} + a_1 \hat{y}_{PB_{i+1}} + a_1 \hat{z}_{PB_{i+1}} = \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_{PB}} b_1 + \dots + \frac{\partial f_{K,i}}{\partial x_{PB}} b_K \\ a_2 \hat{x}_{PB_{i+1}} + a_2 \hat{y}_{PB_{i+1}} + a_2 \hat{z}_{PB_{i+1}} = \frac{\partial f_{1,i}}{\partial y_{PB}} b_1 + \dots + \frac{\partial f_{K,i}}{\partial y_{PB}} b_K \\ a_3 \hat{x}_{PB_{i+1}} + a_3 \hat{y}_{PB_{i+1}} + a_3 \hat{z}_{PB_{i+1}} = \frac{\partial f_{1,i}}{\partial z_{PB}} b_1 + \dots + \frac{\partial f_{K,i}}{\partial z_{PB}} b_K \end{cases}$$

o qual pode ser facilmente resolvido por eliminação gaussiana. Logo, a solução proposta nesse trabalho é sumarizada no Algoritmo 1.

Algorithm 1 Método proposto

- 1: **Entrada:** $K, E_{min}, x_{PB_i}, y_{PB_i}, z_{PB_i}, imax = 10, tol = 1e - 02$
 - 2: **Saída:** $x_{PB_{i+1}}, y_{PB_{i+1}}, z_{PB_{i+1}}$
 - 3: $iter = 0$
 - 4: $error = \infty$
 - 5: Calcular o vetor de beamforming (7) e o vetor de canal (3)
 - 6: **while** ($iter < imax$) & ($error > tol$) **do**
 - 7: Construir o sistema de equações (14)
 - 8: Aplicar o método de Newton-Raphson (15)
 - 9: Escrever o sistema linearizado (18)
 - 10: Resolver o sistema linearizado por Mínimos Quadrados (21)
 - 11: Atualizar o erro dado pela norma do vetor (19)
 - 12: $iter = iter + 1$
 - 13: **end while**
 - 14: $Solucao = [x_{PB_{i+1}}, y_{PB_{i+1}}, z_{PB_{i+1}}]$
 - 15: **return** Solução.
-

IV. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados numéricos obtidos considerando a solução proposta descrita anteriormente. Além disso, como *benchmarks*, consideramos (i) Abordagem Aleatória - SCSI, no qual o PB é posicionado aleatoriamente e o projeto do *beamforming* considera apenas conhecimento do SCSI; (ii) Solução Proposta - PCSI, no qual o PB é posicionado considerando a abordagem descrita na Seção III e o projeto do *beamforming* analógico no PB é realizado de forma otimizada, ou seja, é considerado o conhecimento perfeito do CSI no PB; e (iii) Solução Proposta - SCSI, no qual a posição do PB é determinada pela solução proposta descrita na Seção III e o projeto do *beamforming* é realizado considerando apenas o conhecimento do SCSI no PB.

Os resultados apresentados nessa seção são obtidos considerando os seguintes parâmetros de simulação caso não especificado: $R = 20$, $N = 4$, $K = 20$, $f = 915$ MHz, $\kappa = 1$, $\alpha = 2.7$, $P_T = 3$ W, $\mu = 10.73$ mW, $a = 0.2308$, $b = 5.365$, $E_{min} = 10$ μ J e $2 \leq z_{PB} \leq R$ m, $z_{min} = 2$ m. Todas as curvas representam a média para 500 realizações de canal e 30 configurações de posicionamento diferentes dos dispositivos IoT. Para cada cenário, foi calculada a média aritmética das coordenadas dos dispositivos para atribuição de um ponto inicial para o algoritmo de Newton-Raphson.

Visando comprovar a eficiência do método proposto, a Figura 1 ilustra diferentes distribuições de dispositivos no plano Oxy . Em (a), os dispositivos se encontram apenas no terceiro quadrante, enquanto o método de Newton-Raphson posiciona o PB próximo ao centro do aglomerado. Em (b), os dispositivos foram distribuídos entre o primeiro e terceiro quadrantes e o PB encontra-se próximo à origem do plano, de modo que ambos os grupos possam ser carregados. Por fim, em (c) os dispositivos seguem uma distribuição uniforme e o ponto determinado para o PB se encontra na região central. Portanto, percebe-se a eficácia do método proposto, uma vez que o PB se encontra em regiões favoráveis às diferentes distribuições, sem divergir.

Além disso, para ilustrar a influência do número de dispositivos IoT, a Figura 2 apresenta uma análise da energia total coletada pelos dispositivos IoT (E_T) versus K . A partir dos resultados obtidos, pode-se verificar que a solução proposta (PCSI) aumenta em até 99,53%, 94,98%, 94,91% e 94,97% E_T . Enquanto a solução proposta (SCSI) aumenta em até 74,66%, 72,56%, 71,76% e 72,41% E_T . Ambos para $K = 10, 20, 30, 40$, respectivamente.

Ainda, a Figura 3 ilustra a influência do número de antenas do PB (N) na energia total coletada pelos dispositivos IoT (E_T). Através dos resultados obtidos, observa-se que E_T aumenta com N , isto é, quanto maior a diretividade do arranjo de antenas do PB maior a energia coletada pelos dispositivos IoT. No entanto, o aumento de N também resulta em uma maior complexidade de *hardware* e custo, o que pode ser um limitante em sistemas práticos. Por fim, a Figura 4 apresenta a análise da influência do raio do sistema (R) em E_T . Nota-se que, conforme o raio aumenta, a energia coletada diminui consideravelmente. Entretanto, considerando o posicionamento sub-ótimo determinado pela solução proposta, E_T permanece superior à configuração aleatória.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta uma nova abordagem numérica baseada no Método *Newton-Raphson* para maximizar a energia coletada pelos dispositivos IoT atendendo às restrições de energia mínima para cada dispositivo IoT, restrições da arquitetura de *beamforming* analógico e restrições de posicionamento do PB. Os resultados obtidos demonstram a importância do posicionamento do PB em sistemas WET e comprovam a eficiência da solução proposta, mesmo considerando apenas o conhecimento do SCSI no PB. Por fim, em trabalhos futuros pretende-se estender a solução proposta considerando cenários com múltiplos PBs.

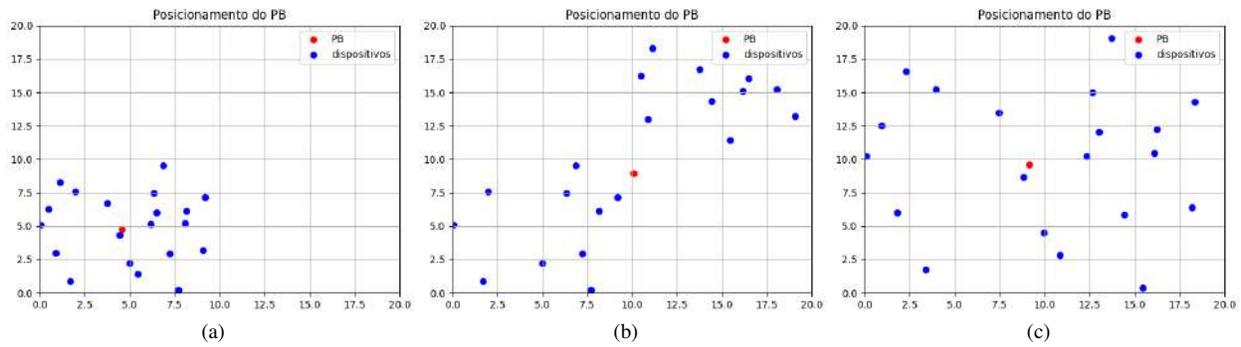


Fig. 1. Diferentes distribuições de dispositivos

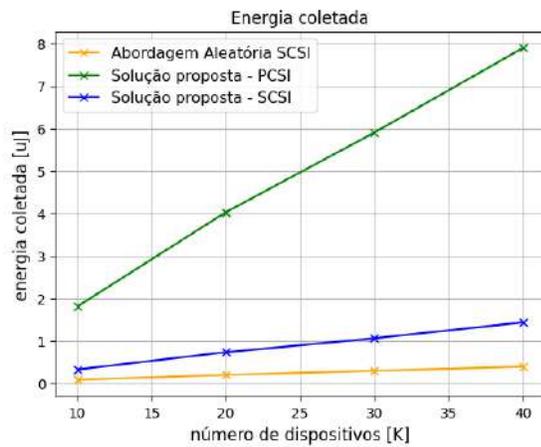


Fig. 2. Energia total coletada pelos dispositivos IoT (E_T) versus o número de dispositivos (K).

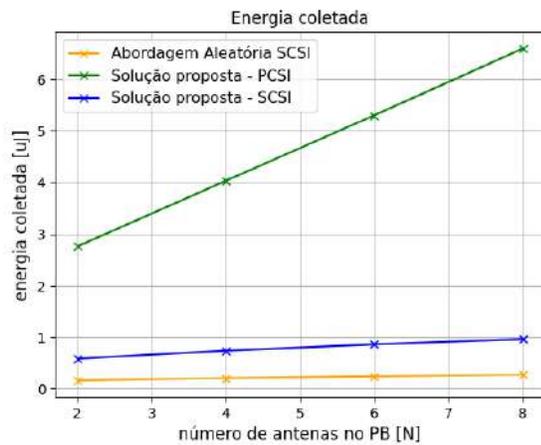


Fig. 3. Energia total coletada pelos dispositivos IoT (E_T) versus o número de antenas no PB (N).

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu financiamento parcial do projeto XGM-AFCCT-2024-4-1-1, apoiado pelo xGMobile - Centro de Competências em Redes 5G e 6G, com recursos financeiros do programa PPI IoT/Manufacturing 4.0 do MCTI, edital número 052/2023, firmado com a EMBRAPPII. Adicionalmente, este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, nº 01245.020548/2021-07, no âmbito do projeto Brasil 6G do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel),

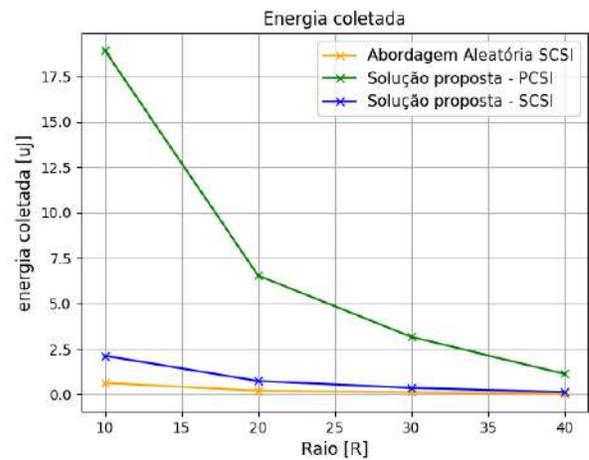


Fig. 4. Energia total coletada pelos dispositivos IoT (E_T) versus o raio do sistema (R).

e pela FAPEMIG no âmbito dos projetos nº APQ-05305-23, APQ-04523-23, PPE-00124-23 e RED-00194-23.

REFERÊNCIAS

- [1] O. L. A. López, R. D. Souza H. Alves, S. Montejo-Sánchez, E. M. G. Fernández e M. Latva-Aho. "Massive Wireless Energy Transfer: Enabling Sustainable IoT Toward 6G Era". Em: *IEEE Internet of Things Journal* 8 (2021), pp. 8816–8835. ISSN: 0164-1212. DOI: [10.1109/JIOT.2021.3050612](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3050612).
- [2] Md. Amanath Ullah, Rasool Keshavarz, Mehran Abo-lhasan, Justin Lipman, Karu P. Esselle e Negin Shariati. "A Review on Antenna Technologies for Ambient RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer: Designs, Challenges and Applications". Em: *IEEE Access* 10 (2022), pp. 17231–17267. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3149276](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3149276).
- [3] Osmel Martínez Rosabal, Onel L. Alcaraz López, Hirley Alves e Matti Latva-Aho. "Sustainable RF Wireless Energy Transfer for Massive IoT: Enablers and Challenges". Em: *IEEE Access* 11 (2023), pp. 133979–133992. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3337214](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3337214).
- [4] Mohammad Javad Karimi, Alexandre Schmid e Catherine Dehollain. "Wireless Power and Data Transmission for Implanted Devices via Inductive Links: A Systema-

- tic Review”. Em: *IEEE Sensors Journal* 21.6 (2021), pp. 7145–7161. DOI: [10.1109/JSEN.2021.3049918](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049918).
- [5] Onel L. A. López, Francisco A. Monteiro, Hirley Alves, Rui Zhang e Matti Latva-Aho. “A Low-Complexity Beamforming Design for Multiuser Wireless Energy Transfer”. Em: *IEEE Wireless Communications Letters* 10.1 (2021), pp. 58–62. DOI: [10.1109/LWC.2020.3020576](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3020576).
- [6] Bruno Clerckx, Rui Zhang, Robert Schober, Derrick Wing Kwan Ng, Dong In Kim e H. Vincent Poor. “Fundamentals of Wireless Information and Power Transfer: From RF Energy Harvester Models to Signal and System Designs”. Em: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 37.1 (2019), pp. 4–33. DOI: [10.1109/JSAC.2018.2872615](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2872615).
- [7] Onel L. A. López, Hirley Alves, Richard Demo Souza e Samuel Montejo-Sánchez. “Statistical Analysis of Multiple Antenna Strategies for Wireless Energy Transfer”. Em: *IEEE Transactions on Communications* 67.10 (2019), pp. 7245–7262. DOI: [10.1109/TCOMM.2019.2928542](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2928542).
- [8] Onel L. A. López, Samuel Montejo-Sánchez, Richard D. Souza, Constantinos B. Papadias e Hirley Alves. “On CSI-Free Multiantenna Schemes for Massive RF Wireless Energy Transfer”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 8.1 (2021), pp. 278–296. DOI: [10.1109/JIOT.2020.3003114](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3003114).
- [9] Onel L. A. López, Hirley Alves, Samuel Montejo-Sánchez, Richard Demo Souza e Matti Latva-aho. “CSI-Free Rotary Antenna Beamforming for Massive RF Wireless Energy Transfer”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 9.10 (2022), pp. 7375–7387. DOI: [10.1109/JIOT.2021.3107222](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3107222).
- [10] Junling Shi, Peiyu Cong, Liang Zhao, Xingwei Wang, Shaohua Wan e Mohsen Guizani. “A Two-Stage Strategy for UAV-Enabled Wireless Power Transfer in Unknown Environments”. Em: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 23.2 (2024), pp. 1785–1802. DOI: [10.1109/TMC.2023.3240763](https://doi.org/10.1109/TMC.2023.3240763).
- [11] Jinho Kang, Junil Choi e Wan Choi. “Multi-User Energy Beamforming for Different Energy Requests”. Em: *IEEE Wireless Communications Letters* 10.8 (2021), pp. 1687–1691. DOI: [10.1109/LWC.2021.3077411](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3077411).
- [12] Donghyun Lee, Cheol Lee, Gunhee Jang, Woongsoo Na e Sungrae Cho. “Energy-Efficient Directional Charging Strategy for Wireless Rechargeable Sensor Networks”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 9.19 (2022), pp. 19034–19048. DOI: [10.1109/JIOT.2022.3163400](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3163400).
- [13] Osmel Martinez Rosabal, Onel L. Alcaraz Lopez, Hirley Alves, Samuel Montejo-Sanchez e Matti Latva-Aho. “On the Optimal Deployment of Power Beacons for Massive Wireless Energy Transfer”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 8.13 (jul. de 2021), pp. 10531–10542. ISSN: 2372-2541. DOI: [10.1109/jiot.2020.3048065](https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3048065) URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048065>.
- [14] D. Arivudainambi e S. Balaji. “Optimal Placement of Wireless Chargers in Rechargeable Sensor Networks”. Em: *IEEE Sensors Journal* 18.10 (2018), pp. 4212–4222. DOI: [10.1109/JSEN.2018.2821176](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2821176).
- [15] Haipeng Dai, Xiaoyu Wang, Alex X. Liu, Huizhen Ma, Guihai Chen e Wanchun Dou. “Wireless Charger Placement for Directional Charging”. Em: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 26.4 (2018), pp. 1865–1878. DOI: [10.1109/TNET.2018.2855398](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2855398).
- [16] V D P Souto, O M Rosabal, S MSánchez, O L. A. López, R D Souza e H Alves. “Otimização do Tempo de Recarga com Transmissão de Energia sem Fio Usando Beamforming Analógico Baseado nas Estatísticas do Canal”. Em: *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais* (2023). DOI: [10.14209/sbrt.2023.1570914996](https://doi.org/10.14209/sbrt.2023.1570914996).
- [17] Elena Boshkovska, Derrick Wing Kwan Ng, Nikola Zlatanov e Robert Schober. “Practical Non-Linear Energy Harvesting Model and Resource Allocation for SWIPT Systems”. Em: *IEEE Communications Letters* 19.12 (2015), pp. 2082–2085. DOI: [10.1109/LCOMM.2015.2478460](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2478460).
- [18] S. C. Chapra e R. P. Canale. *Numerical Methods for Engineers*. 7th. McGraw-Hill Education, 2015. ISBN: 9780073397924.
- [19] G. Strang. *Linear Algebra and its applications*. 4th. Cengage Learning, 2005. ISBN: 1133442897, 9781133442899.

AUTORES

Natália Pereira Batista é graduanda em Engenharia de Computação pelo Inatel - Instituto Nacional de Telecomunicações - e é membro do programa “Jovens Talentos”. Atua como bolsista de iniciação científica no “WAI Lab Inatel” em “Estudo e Implementação de Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas na Otimização de Sistemas de Transmissão de Energia Sem Fio”. Seus interesses de pesquisa incluem: transferência de energia sem fio, inteligência artificial e técnicas de otimização.



Victoria Dala Pegorara Souto é graduada em Engenharia de Computação pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM (2014), Mestre em Engenharia Elétrica pela UFSM e Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (2021). Em 2020, foi estudante visitante de doutorado na Universidade de Sydney em Camperdown, NSW, Austrália. Em 2021-2023, foi pesquisadora de pós-doutorado



na UFSC atuando junto ao projeto Brasil 6G coordenado pelo Inatel e, atualmente, é Professora Assistente no Inatel. Seus interesses de pesquisa estão nas áreas de comunicações sem fio, redes 5G e 6G, transferência de energia sem fio e inteligência artificial.

Validação e otimização de sistemas IoT de monitoramento e alertas aplicados em ambiente hospitalar

Felipe Silveira Barbosa, Prof. Filipe B. Vilela, Luma Rissatti Borges do Prado, Marcos Henrique Barbosa Pereira
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
felipe.s@ges.inatel.br, filipe.bueno@inatel.br, luma.prado@inatel.br, marcos.h@gec.inatel.br

Abstract—This work presents the studies conducted in partnership with the Hospital Santa Casa de Belo Horizonte for the development and validation of technological solutions aimed at optimizing hospital processes. The objective was to create a unified web application capable of integrating functionalities for medical equipment localization, refrigerator temperature monitoring, and improving the efficiency of bed call processes. The solutions were developed based on Internet of Things (IoT) technologies, combined with web development techniques and Python programming.

Index Terms—Web Platform, Hospital Management, Internet of Things, Monitoring.

Resumo—Este trabalho apresenta os estudos realizados em parceria com o Hospital Santa Casa de Belo Horizonte para o desenvolvimento e validação de soluções tecnológicas voltadas à otimização de processos hospitalares. O objetivo foi criar uma aplicação *web* unificada, capaz de integrar funcionalidades para localização de equipamentos médicos, monitoramento da temperatura de refrigeradores e aprimoramento da eficácia das chamadas de leito. As soluções foram desenvolvidas com base em tecnologias de Internet das Coisas (IoT), aliadas a técnicas de desenvolvimento web e análise de dados em Python.

Palavras chave—Plataforma Web, Gestão Hospitalar, Internet das Coisas, Monitoramento.

I. INTRODUÇÃO

A integração de tecnologias inovadoras no setor hospitalar tem-se mostrado essencial para otimizar processos, melhorar a segurança dos pacientes e aumentar a eficiência das operações e gestão do ambiente médico-hospitalar como um todo [1]. O crescente uso da Tecnologia da Informação (TI) permite a implementação de soluções que não apenas facilitam o gerenciamento de dados e equipamentos, mas também moldam a maneira como os serviços de saúde são prestados, contribuindo para a eficiência no atendimento e para a qualidade do cuidado médico [2]. Diante disso, torna-se possível solucionar algumas problemáticas que impactam diretamente na qualidade do atendimento e nos resultados clínicos, como a desorganização de dados, a gestão ineficiente de equipamentos, o monitoramento inadequado de refrigeradores e as falhas na comunicação entre pacientes e equipe médica.

A gestão adequada de materiais hospitalares compreende uma necessidade primordial para o uso apropriado e eficaz desses elementos, para assim melhorar a qualidade geral dos processos clínicos, bem como garantir a sua melhor disponibilidade para utilização [3]. O gerenciamento sobre a localização dos equipamentos médico-assistenciais (EMA) está inserido

nesse contexto e seu rastreamento, quando feito de forma ineficiente, pode acarretar diversos problemas, tais quais perda de tempo, aumento de custos operacionais, falha no atendimento aos pacientes e indisponibilidade de instrumentos hospitalares.

A presença de múltiplos equipamentos médicos de diferentes tipos e funções exige uma gestão ágil e precisa, mas a desorganização e a falta de rastreamento em tempo real frequentemente resultam em dificuldades na utilização e no manuseio adequado desses dispositivos [4].

Além disso, o monitoramento de refrigeradores hospitalares, essencial para o armazenamento adequado de medicamentos, vacinas e outros insumos biológicos, também se configura como uma grande preocupação. Falhas no controle de temperatura desses equipamentos podem resultar em danos irreparáveis a todo material que dependa de uma climatização apropriada, colocando em risco a saúde dos pacientes e resultando em perdas financeiras devido à deterioração de medicamentos, insumos ou demais materiais biológicos [5].

Por fim, a chamada de leito, uma funcionalidade importante para agilizar o atendimento e melhorar a experiência do paciente, também é um tópico indispensável a ser abordado dentro do ambiente hospitalar. A comunicação ineficaz entre pacientes e equipe médica pode resultar em atrasos no atendimento, aumento do tempo de internação, aplicação de tratamentos impotentes e insatisfação dos pacientes. Esses sistemas não apenas garantem que as necessidades dos pacientes sejam atendidas de forma eficiente, mas também contribuem para a organização e eficiência da equipe médica [6] [7].

Isto posto, a partir do levantamento de demandas e necessidades reais identificadas por meio de uma parceria firmada com o Hospital Santa Casa de Belo Horizonte, em trabalhos anteriores foram desenvolvidos três projetos voltados para a solução dessas problemáticas, abrangendo os conceitos e ferramentas de Tecnologia da Informação (TI) e Internet das Coisas (IoT), compondo assim os núcleos de estudo dessa pesquisa. O primeiro, denominado *Chamada*, é responsável por um sistema de chamada de leitos, permitindo que os pacientes contatem a equipe médica e, simultaneamente, possibilita à equipe visualizar quantos e quais indivíduos necessitam de assistência [8]. Já o segundo núcleo, designado *Monitora*, foca no acompanhamento e registro contínuo dos dados de temperatura de refrigeradores e geladeiras clínicas, os quais auxiliam no manuseio e no armazenamento adequados de materiais e insumos hospitalares [9]. Por fim, o terceiro núcleo, chamado

Localiza, realiza o controle de localização dos equipamentos, máquinas e materiais utilizados pelo corpo clínico, garantindo uma melhor organização e maior disponibilidade dos recursos médicos utilizados dentro do centro clínico [10]. Esses núcleos, em conjunto, visam otimizar os processos hospitalares, melhorando a eficiência e a qualidade do atendimento aos pacientes, além de proporcionar uma melhora significativa no serviço prestado pelos profissionais de saúde.

Entretanto, nestes trabalhos as interfaces de visualização desses sistemas foram desenvolvidas utilizando a plataforma *Looker Studio*, amplamente empregada na criação de painéis informativos e relatórios de dados. Embora essa ferramenta ofereça recursos úteis para a concepção das soluções, sua utilização impõe limitações à implementação de funcionalidades adicionais e de maior complexidade. Além disso, a separação independente dos projetos dificulta a visualização integrada das informações e compromete a navegação entre os diferentes núcleos. Outro aspecto a ser considerado é a dependência da plataforma em relação à integração com outras ferramentas para a obtenção dos dados, como as *Planilhas Google* utilizadas nos projetos. Essa necessidade impõe um maior processamento e filtragem das informações em múltiplas plataformas, resultando em uma redução da eficiência e no aumento do tempo de resposta dos sistemas.

Diante dessas limitações, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma aplicação *web* unificada, capaz de integrar os três projetos em uma plataforma interativa autoral, centralizando a administração e a exibição das informações. Essa abordagem não apenas permitirá uma maior flexibilidade na personalização das soluções, adaptando-se às necessidades específicas de cada projeto, mas também facilitará a implementação de novas funcionalidades e otimizará a experiência do usuário. Além disso, a centralização dos dados e funcionalidades em um único ambiente contribuirá para a escalabilidade do sistema, reduzindo a dependência de ferramentas externas e aprimorando a eficiência no processamento e na visualização das informações.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi estruturado em duas etapas principais. A primeira, denominada *Validação*, consistiu no acompanhamento dos testes, realizados com os protótipos anteriormente desenvolvidos, em parceria com a equipe da Santa Casa de Belo Horizonte, a fim de verificar sua eficácia e adequação às necessidades identificadas. Com a conclusão dessa etapa, teve início a fase de *Otimização*, durante a qual foi desenvolvida a nova plataforma *web*, além da implementação de melhorias e novas funcionalidades nos projetos já existentes, visando aprimorar sua eficiência e usabilidade.

Na etapa de *Validação*, os protótipos foram entregues ao time do hospital para a realização de testes no ambiente hospitalar, em cenários reais de aplicação. O objetivo era obter um *feedback* amplo sobre o desempenho das soluções, identificando tanto comportamentos de sucesso quanto falhas. Durante esse período, o suporte foi prestado remotamente por meio de reuniões online, nas quais a equipe médica relatava os casos de uso testados e os resultados observados. Com base nessas informações, eram enviadas atualizações de código para

correção de erros identificados, além do reenvio dos dispositivos físicos quando necessário, para ajustes no hardware e substituição de componentes para melhor atender às demandas específicas de cada aplicação.

Com o retorno dos testes da Santa Casa, teve início a etapa de *Otimização*, na qual foram implementadas melhorias nos três projetos, com ênfase no desenvolvimento da aplicação *web*. Nesse processo, primariamente, realizou-se um levantamento dos recursos a serem utilizados, identificando quais seriam mantidos dos projetos originais e quais necessitariam de adaptações, considerando entre recursos de *Hardware*, Banco de Dados e *Software Web*. Cada tópico levantado será abordado a seguir:

A. Hardware

Para os dispositivos físicos, decidiu-se manter os equipamentos originais, visto que eles já apresentam atributos e capacidades adequados ao projeto. Para o *hardware*, foram utilizados os microcontroladores *ESP32* e *ESP8266*, que são capazes de coletar e transmitir os dados necessários para um banco de dados por meio da Internet, utilizando conexão com redes móveis ou *Wi-Fi*.

Tendo em mente a não alteração nos dispositivos físicos, foram realizadas análises sobre a construção dos equipamentos desenvolvidos para cada núcleo. Os materiais e ferramentas utilizadas na elaboração de cada um dos *hardwares* e suas respectivas funcionalidades são abordadas a seguir:

a.1) Chamada

O equipamento físico do núcleo *Chamada* é composto por três dispositivos diferentes: leito, porta e central. Todos utilizam o microcontrolador *ESP8266* integrado no kit de desenvolvimento *Wemos D1 Mini*.

O dispositivo *Leito* permite a comunicação entre o paciente e a equipe médica. Integrado ao microcontrolador *ESP8266*, o dispositivo envia um sinal positivo para o banco de dados sempre que o botão de chamada é acionado pelo paciente. Após o atendimento, o profissional da saúde pode pressionar outro botão para finalizar a chamada, enviando um sinal negativo para o banco de dados. Além disso, um LED integrado ao circuito é acionado para indicar chamadas ativas e apagado quando a chamada é encerrada. A Figura 1 ilustra o esquemático para o circuito do *Leito*.

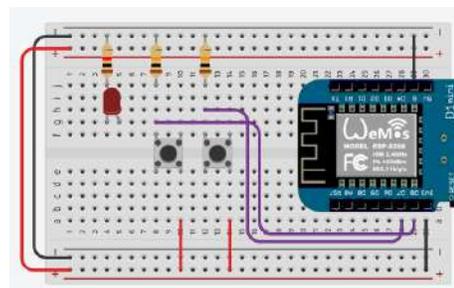


Fig. 1. Circuito do dispositivo Leito

Para cada quarto, foi instalado um dispositivo *Porta*, cuja função é sinalizar as chamadas ativas dos leitos dentro dele. O circuito do equipamento é composto pelo microcontrolador

ESP8266, conectado a um LED. O dispositivo verifica constantemente o estado dos leitos no quarto e, caso ao menos um leito tenha uma chamada ativa, o LED será aceso. Quando não houver chamadas ativas, o LED será apagado, indicando que não há solicitações pendentes.

Por fim, há um dispositivo *Central*, disposto em uma sala de controle da ala médica, responsável pela sinalização de chamadas de um conjunto de quartos. Semelhante ao dispositivo *Porta*, a *Central* tem como função a sinalização de chamadas, porém, além de um LED, o dispositivo também conta com a implementação de um *buzzer*, o esquemático da Figura 2 ilustra o circuito de ambos os equipamentos. A lógica de funcionamento segue de forma análoga, realizando uma verificação no banco de dados para detectar chamadas ativas em qualquer um dos quartos monitorados. Caso haja alguma chamada ativa, tanto o LED quanto o *buzzer* são acionados. Quando não houver chamadas ativas, ambos são desativados.

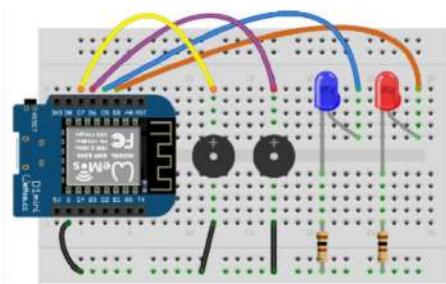


Fig. 2. Circuito dos dispositivos Porta e Central

a.2) Monitora

No caso do núcleo *Monitora*, é composto por um único tipo de dispositivo, que utiliza o microcontrolador ESP32. Este microcontrolador foi escolhido devido ao seu maior poder de processamento e maior capacidade de memória, garantindo um desempenho superior e eficiente para as funcionalidades aplicadas a este núcleo. Junto ao ESP32, o dispositivo conta com um sensor DS18B20, responsável por obter os valores de temperatura do refrigerador em que está inserido. Periodicamente, o ESP32 envia os dados de temperatura para o banco de dados, mantendo o sistema constantemente atualizado.

Além de monitorar a temperatura atual, o dispositivo também realiza uma comparação para identificar picos de temperaturas máximas e mínimas durante um intervalo. Para garantir a continuidade do monitoramento durante perdas de energia, o *hardware* é complementado por uma caixa de bateria, que assegura o funcionamento do dispositivo e o armazenamento dos dados de temperatura na memória interna. Assim que a energia é restabelecida, esses dados são enviados para o *Firestore*. A caixa de bateria é composta por uma bateria de lítio recarregável, um módulo de carregamento TP4056 e um regulador de tensão LM1117 de 3,3 volts. A Figura 3 representa o esquemático do dispositivo.

a.3) Localiza

Dois dispositivos foram desenvolvidos para o *Localiza*: o *scanner* e o *beacon*. A interação entre eles é essencial para viabilizar a rastreabilidade de equipamentos no ambiente hospitalar. Ambos utilizam o microcontrolador ESP32, que,

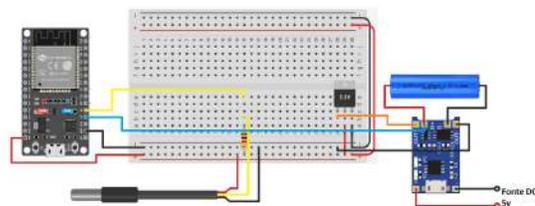


Fig. 3. Circuito do dispositivo do Monitora

além de oferecer maior capacidade de processamento, como no *Monitora*, também explora um recurso indispensável: o *bluetooth*. A comunicação entre os dispositivos ocorre por meio da emissão e leitura de sinais *Bluetooth Low Energy (BLE)*, permitindo a validação da localização dos equipamentos no sistema.

O *beacon*, que atua como sinalizador do projeto e foi acoplado ao equipamento médico a ser rastreado, é composto pelo ESP32, responsável pela emissão dos sinais BLE, e um conjunto formado por uma bateria de lítio e um módulo carregador TP4056 para sua alimentação, circuito esse ilustrado na Figura 4. Já o *scanner*, alocado nos ambientes, também baseado no ESP32, é alimentado por uma fonte de 5V e realiza, periodicamente, a varredura dos ambientes. Ele detecta os sinais BLE emitidos pelos *beacons* e envia à base de dados os valores de potência do sinal e o momento em que o equipamento foi identificado.

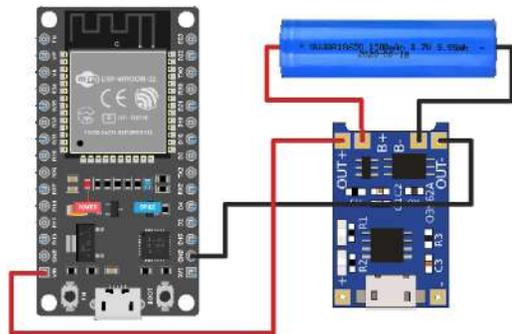


Fig. 4. Circuito beacon do Localiza

B. Banco de Dados

A base de dados utilizada inicialmente era o *Firestore*, que se mostrou eficaz para as necessidades do projeto. No entanto, considerando o crescimento do volume de informações e a potencial escalabilidade dos sistemas, esse banco poderia apresentar limitações nas operações de leitura de dados. Diante desse cenário, optou-se pela migração para o *Firestore*, que oferece um sistema nativo de buscas e filtros, reduzindo o custo de processamento das aplicações integradas.

C. Software Web

Por fim, a ferramenta escolhida para o desenvolvimento *web* foi o *framework Django*, utilizando a linguagem *Python*. Essa escolha se justificou pelo fato de o *Python* já ser empregado nas operações com o banco de dados, permitindo que, com o *Django*, essas funcionalidades fossem facilmente adaptadas para a aplicação *web*. Além disso, sua compatibilidade com outras bibliotecas da linguagem proporciona maior flexibilidade

e eficiência no desenvolvimento. Junto a isso, para o *front-end* e comportamento interativo das páginas, foram necessárias as utilizações das linguagens *HTML*, *CSS* e *JavaScript*.

A etapa de concepção da plataforma contou com o acompanhamento da equipe da Santa Casa por meio de reuniões regulares, nas quais eram apresentados desde os conceitos fundamentais do *front-end* até as funcionalidades operacionais e visuais das páginas. Essa colaboração foi essencial para garantir o alinhamento entre as necessidades do hospital e as capacidades oferecidas pela nova plataforma.

Além disso, por se tratar de uma aplicação *web*, o projeto também incluiu a implementação de um sistema de hospedagem. Para esse fim, optou-se pelo Heroku, que permitiu a alocação de um domínio de acesso para a aplicação, eliminando a necessidade de sua execução em um computador local.

III. RESULTADOS

Neste segmento são descritos e analisados os resultados obtidos nos diferentes segmentos dos três núcleos desenvolvidos. Dessa forma, são destacadas as funcionalidades, operação e eficácia do sistema IoT Santa Casa.

A. Chamada

a.1) Banco de Dados

A estrutura de dados do núcleo *Chamada* foi projetada para organizar as informações de maneira clara e hierárquica. Cada central é representada por um documento dentro de uma coleção geral, que armazena todas as centrais do sistema. Em cada central, estão os documentos que representam os quartos e, dentro de cada quarto, a listagem correspondente de seus leitos. Essa organização facilita a navegação e o acesso eficiente entre os diferentes níveis do sistema. Cada documento de leito armazena informações essenciais para o funcionamento do núcleo, incluindo o estado atual da chamada, o marcador de tempo da última alteração e os dados da interação anterior, que servem como auxiliares para o correto funcionamento da aplicação *web*. Apresentado na Figura 5, está a estrutura de dados utilizada no projeto.

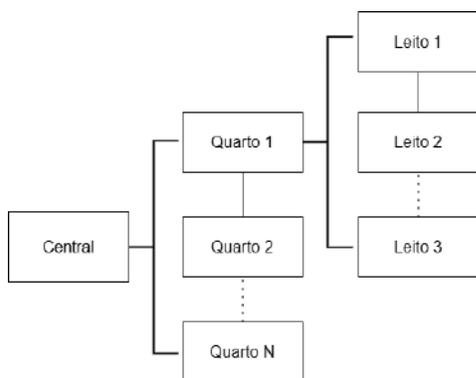


Fig. 5. Estrutura de dados para o *Chamada*

a.2) Web

A interface *web* do núcleo *Chamada* foi planejada para exibir exclusivamente as informações essenciais ao usuário, eliminando a necessidade de interação manual. Cada central possui um painel que lista todos os seus quartos e respectivos

leitos, apresentando o estado das chamadas e o tempo decorrido para os atendimentos, assim ilustrado na Figura 6. Além disso, um alerta visual e sonoro é acionado sempre que uma nova chamada é realizada, garantindo a rápida notificação à equipe médica.

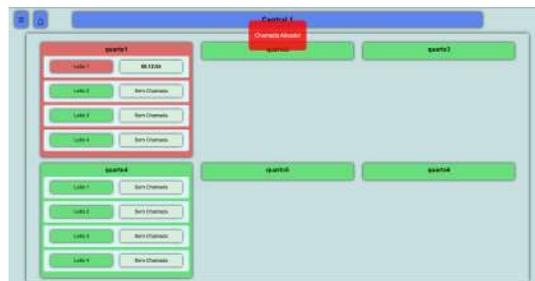


Fig. 6. Página Web do núcleo *Chamada*

B. Monitora

b.1) Banco de Dados

O armazenamento das informações no sistema do *Monitora* abrange tanto os dados em tempo real, fornecidos pelos dispositivos de monitoramento, quanto configurações e um histórico das variações de temperatura. Para cada equipamento, são registrados valores essenciais, como a temperatura atual, as temperaturas máximas e mínimas observadas, o tempo da última atualização e o estado de alimentação (bateria ou rede elétrica). Esses dados representam o status atual de cada refrigerador, permitindo uma visualização precisa do seu funcionamento. Além disso, são armazenadas as configurações de temperatura ideal para cada refrigerador, estabelecendo os limites máximos e mínimos de operação. O sistema também coleta e armazena um histórico das temperaturas, fornecendo dados valiosos para análises de desempenho e eficácia dos refrigeradores ao longo do tempo.

b.2) Web

A visualização das informações do *Monitora* ocorre em uma única página, projetada para exibir de forma clara e organizada os dados de todos os refrigeradores simultaneamente. Para cada geladeira, é apresentado um quadro contendo o status atual, com a temperatura atual, as temperaturas máximas e mínimas registradas e a data da última atualização. Esses quadros são interativos e visualmente responsivos: a cor dos campos de temperatura muda automaticamente sempre que os valores saem da faixa ideal configurada, e o estado de alimentação do dispositivo também é destacado, por meio de alterações de cor, indicando se o refrigerador está sendo alimentado pela rede elétrica ou pela bateria. Além disso, ao interagir com o quadro de um refrigerador específico, é possível visualizar o histórico de temperatura correspondente. A aplicação também é responsável pela geração automática desse histórico, criando periodicamente uma nova instância na base de dados para cada refrigerador. Após um intervalo de tempo preestabelecido, um PDF é gerado, contendo uma tabela detalhada que exibe o histórico de temperaturas registrado para cada equipamento. Seguem imagens ilustrando a página web (Figura 7) e o PDF de histórico de temperaturas (Figura 8) do núcleo *Monitora*:



Fig. 7. Página Web do núcleo *Monitora*

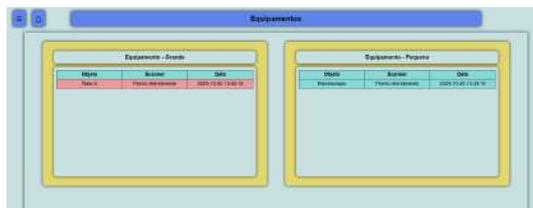


Fig. 9. Página web do núcleo *Localiza*

Relatório de Dados CSV

Refrigerador: D4-D4-DA-E5-3D-05

Período: 2024-10-15

Temp Max: 8.7 | Temp Min: -2.0

data	hora	temperatura
15/10/2024	15:07	5.3
15/10/2024	15:12	5.3
15/10/2024	15:17	5.3
15/10/2024	15:22	5.3
15/10/2024	15:27	5.3
15/10/2024	15:32	5.3
15/10/2024	15:37	5.3
15/10/2024	15:42	-2.0
15/10/2024	15:47	-2.0

Fig. 8. PDF do histórico de temperaturas

C. Localiza

c.1) Banco de Dados

Quanto ao armazenamento de dados, o *Localiza* armazena informações provenientes dos dispositivos físicos, além de registrar as configurações dos componentes inseridos no sistema. Os dados principais consistem em uma lista de *beacons* identificados, na qual, para cada *beacon*, são armazenados os *scanners* que o detectaram, com seus respectivos valores de potência de sinal e o tempo em que a identificação ocorreu. Além disso, também são armazenados dados de configuração dos equipamentos, tanto para os *beacons* quanto para os *scanners*. Para os *scanners*, é registrado o ambiente ou sala em que ele se encontra. Já para os *beacons*, são armazenados o nome do equipamento, sua classificação de tipo e o valor de um *scanner* que representa sua sala *Home*, ou seja, o ambiente estacionário onde o equipamento deve ser guardado quando não estiver em uso.

c.2) Web

Por fim, a interface *web* do *Localiza* cria uma visualização simples em lista, exibindo todos os equipamentos rastreados pelo sistema. A aplicação realiza uma consulta ao banco de dados para identificar qual *scanner* possui o melhor valor de potência do sinal BLE emitido pelo *beacon* rastreado, já que, quanto maior a potência do sinal, mais próximos o *beacon* e o *scanner* estão. Com base nisso, a posição do equipamento na lista é atribuída ao ambiente onde seu sinal foi mais forte, e o processo é repetido para todos os dispositivos cadastrados no sistema. Além disso, os equipamentos são agrupados conforme seu tipo registrado no *Firestore* e a cor de cada item na lista é alterada para indicar se o equipamento está ou não em seu ambiente *home*, azul para indicar positivo e vermelho para negativo. A Figura 9 apresenta a construção da página *web* para o *Localiza*.

IV. DISCUSSÕES

O desenvolvimento da plataforma apresentou resultados positivos. Entretanto, observou-se também algumas restrições diante das soluções desenvolvidas, as quais podem limitar o funcionamento adequado do projeto.

Primeiramente, para ambientes com uma rede de internet não confiável, ou sujeita a sobrecarga de uso, os equipamentos físicos podem apresentar uma dificuldade considerável de operar de forma adequada, com possibilidades de apresentarem problemas desde a conexão à rede, até nas operações de transferência de dados. Para contornar esse desafio, uma proposta de utilizar algum outro meio principal de conexão se torna válida, como a implementação de uma rede de comunicação *MQTT* local, por exemplo.

Por fim, outro desafio foi diante do gasto de processamento dos dados provenientes das leituras do banco de dados. Alguns processos realizam a leitura de grandes volumes de informações, os quais, mesmo utilizando as ferramentas de filtragem do *Firestore*, podem ocasionar atrasos nas respostas do sistema, o que impactaria na escalabilidade do projeto. Considerando essa possibilidade, é justificado o estudo sobre uma nova estruturação dos dados da aplicação ou até mesmo a utilização de algum banco de dados secundário utilizado para os processos e tarefas que necessitam do processamento de uma grande massa de informações.

V. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o projeto foi bem-sucedido na criação de soluções para os desafios identificados pelo Hospital Santa Casa. A eficácia das propostas foi validada por meio de testes, mostrando que elas podem melhorar significativamente o gerenciamento, controle e monitoramento dos fluxos de trabalho hospitalares.

A aplicação de tecnologias IoT proporcionou maior agilidade, desde a coleta até a interpretação dos dados, garantindo maior confiabilidade e segurança para a equipe e o hospital. Além disso, a compatibilidade dessas soluções com diversas outras tecnologias facilita sua integração em um único sistema, abrindo possibilidades para a implementação de novas soluções que atendam a outros desafios hospitalares.

Em resumo, o projeto não só traz melhorias através das soluções desenvolvidas, mas também tem grande potencial para se expandir, criando um ecossistema tecnológico integrado que pode otimizar todo o sistema de gestão hospitalar e ajudar a reduzir falhas humanas em diversos processos.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de prestar um agradecimento especial ao eHealth Innovation Center do Instituto Nacional de

Telecomunicações (Inatel) por todo o suporte oferecido para o desenvolvimento desse trabalho e agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Fátima Ferreira Roquete e Lincoln Maciel Motta e Karla Rona da Silva e Stéphane Bruna Barbosa. “TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E GESTÃO HOSPITALAR: Revisão Integrativa (2000-2018)”. Em: *SEGeT* (2020). URL: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos/20/22730262.pdf>
- [2] José Rodrigues Filho e Jefferson Colombo B. Xavier e Ana Lívia Adriano. “A tecnologia da informação na área hospitalar: um caso de implementação de um sistema de registro de pacientes”. Em: *Revista de Administração Contemporânea* 5.1 (2001), pp. 105–120. DOI: [10.1590/S1415-65552001000100007](https://doi.org/10.1590/S1415-65552001000100007), URL: <https://www.scielo.br/j/rac/a/43fLxr3d8HC3LTmmDPY5nwF/>
- [3] Elisabeth Antunes e Marcio do Vale e Patrick Mordelet e Victor Grabois. “A engenharia clínica como estratégia na gestão hospitalar”. Em: *Gestão da tecnologia biomédica: Tecnovigilância e Engenharia Clínica*. Ed. Scientifiques ACODESS, 2002. Cap. 4, pp. 45–67. URL: <https://antigo.anvisa.gov.br/documents/33868/327133/capitulo4.pdf>
- [4] E Coelho e Marilú Da Silva. “Sistema IoT para Localização de Equipamentos Médico-Hospitalares”. Em: *CEBE* (2020). URL: https://www.researchgate.net/publication/359635637_Sistema_IoT_para_Localizacao_de_Equipamentos_Medico-Hospitalares
- [5] Thiago de Lima Barbosa e Renato Bobsin Machado. “Sistema IOT para Monitoramento de Temperatura e Umidade de Refrigeradores e Ambientes em Hospital do Oeste do Paraná: Estudo de Caso”. Em: *Revista Pleiade* 17.41 (2023), pp. 127–136. URL: <https://pleiade.uniamerica.br/index.php/pleiade/article/view/958>
- [6] Beatrice Jean Kalisch e Aimee Elizabeth Labelle e Xie Boqin. “Trabalho em equipe e tempo de resposta às chamadas de enfermagem: estudo exploratório”. Em: *Revista Latino-Americana de Enfermagem* 21.spe (2013). DOI: [10.1590/S0104-11692013000700030](https://doi.org/10.1590/S0104-11692013000700030), URL: <https://www.scielo.br/j/rlae/a/X7yBy9GxqyXs8KzY99rX6cd/>
- [7] Platel Equipamentos Hospitalares. *Sistema de chamada de enfermagem – O que é e como funciona*. URL: <https://platel.com.br/blog/chamada-de-enfermagem-o-que-e-e-como-funciona/> (acesso em 16/01/2025).
- [8] Nathália Almeida e Rayanny Cupertino e Juliano Nascimento e Luma Rissatti. “Sistema de Sinalização Hospitalar para Chamada de Enfermagem Aplicado em Ambiente Hospitalar”. Em: *Incitel* (2024), pp. 59–62. URL: <https://inatel.br/incitel/documents/2024.pdf>
- [9] João Pereira e Monique Freire e Juliano Nascimento e Luma Rissatti. “Monitoramento Digital de Temperatura de Geladeiras e Camaras Frias Aplicado em Ambiente Hospitalar”. Em: *Incitel* (2024), pp. 94–98. URL: <https://inatel.br/incitel/documents/2024.pdf>

- [10] Felipe Silveira e Juliano Nascimento e Luma Rissatti. “Sistema de Segurança Hospitalar, Localização Interna de Materiais e Maquinas Aplicado em Ambiente Hospitalar”. Em: *Incitel* (2024), pp. 135–140. URL: <https://inatel.br/incitel/documents/2024.pdf>

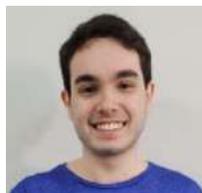
AUTORES

Marcos Henrique Barbosa Pereira



Graduando do 9º período do curso de Engenharia de Computação pelo Instituto Nacional de Telecomunicações. Técnico de Eletrônica com ênfase em Automação Industrial pelo curso técnico da Escola Técnica de Eletrônica “FMC”. Bolsista de Iniciação Científica no laboratório de pesquisas Biomédicas eHealth Innovation Center e voluntário na equipe de robótica do Inatel, RobotBulls.

Felipe Silveira Barbosa



Graduando do 8º período de Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, formado em técnico em Eletrônica com ênfase em Automação Industrial pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa - ETEFMC. Atualmente bolsista de iniciação científica no laboratório eHealth e voluntário na equipe de robótica RobotBulls.

Filipe Bueno Vilela



Graduado em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, mestre e doutorando em Engenharia de Materiais, com foco na área de Biomateriais, pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei). Professor do Inatel. Orientador de projetos do centro de pesquisas em Engenharia Biomédica eHealth Innovation Center.

Luma Rissatti Borges do Prado



Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, mestranda em Engenharia Biomédica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Professora no curso de Engenharia Biomédica do Inatel e professora do curso técnico em equipamentos biomédicos da ETE “FMC”.

Orientadora de projetos do centro de pesquisas em Engenharia Biomédica eHealth Innovation Center.

Superfície Reconfigurável Inteligente: Transmissão de Sinais Fora da Linha de Visada Direta

John Sugahara, Pedro H. C. de Souza, Luciano Leonel Mendes

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

john.nunes@ges.inatel.br, pedro.carneiro@dtel.inatel.br, lucianol@inatel.br

Abstract—This document presents the project Simulation Platform for Communication Systems Assisted by Intelligent Reflective Surfaces (IRS), designed to model the interaction between the IRS, User Equipment (UE), and Access Points (AP). The article aims to explore the technology of reconfigurable intelligent surfaces, their operating principles, and the context in which they are applied, highlighting their relevance in both current and future scenarios.

Index Terms—User Equipment, Access Points, scientific initiation, IRS, communication systems.

Resumo—Este documento apresenta o projeto Plataforma de Simulação para Sistemas de Comunicação Assistidos por Superfícies Reconfiguráveis Inteligentes (RIS), projetado para modelar a interação entre o RIS, o Equipamento de Usuário (UE) e os Pontos de Acesso (AP). O artigo busca explorar a tecnologia de Superfícies Reconfiguráveis Inteligentes, seus princípios de funcionamento e o contexto em que são aplicadas, destacando sua relevância tanto em cenários atuais quanto futuros.

Palavras chave—Equipamento de Usuário, Pontos de acesso, iniciação científica, IRS, sistemas de comunicação.

I. INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias sem fio que dependem de sinais para comunicação tem crescido exponencialmente, impulsionando a demanda por maior largura de banda, menor latência e eficiência energética. Considerando que esses sinais tipicamente propagam-se no espaço livre, é esperado sua atenuação e consequente piora na qualidade de recepção dos sinais dependendo do local onde do receptor ou equipamento do usuário (UE, *User Equipment*) está posicionado. Outros desafios para a propagação do sinal podem surgir devido a obstáculos naturais, como montanhas e florestas, tanto em locais fechados, como túneis, quanto interiores de edifícios [1]. A atenuação por obstáculos ocorre, principalmente, quando o UE está fora da linha de visada direta (LOS, *Line-of-sight*), ou seja, quando não há um caminho livre e desobstruído entre o transmissor e o UE.

É justamente esse desafio que as Superfícies Reconfiguráveis Inteligentes (RISs, *Reconfigurable Intelligent Surfaces*) buscam solucionar. As RISs são capazes de redirecionar e otimizar a propagação dos sinais eletromagnéticos, contornando obstáculos e melhorando a eficiência da comunicação em cenários onde a LOS não está disponível [2]. Desta forma, as RISs representam uma solução para superar limitações impostas pelo cenário de propagação, garantindo conectividade confiável em situações que, até então, eram consideradas desfavoráveis.

Nesse contexto, os autores de [3] abordam o problema da degradação de sinais em ambientes sem LOS, onde obstáculos físicos e a distância da UE em relação à fonte de transmissão comprometem a qualidade da comunicação. Para solucionar esse desafio, os autores de [3] propõem a utilização da RIS como uma tecnologia capaz de reconfigurar dinamicamente o ambiente de propagação de sinais, redirecionando-os de forma otimizada para promover condições favoráveis de propagação. O artigo [3] sugere um método baseado em redes neurais (NNs, *Neural Networks*) para configurar automaticamente os elementos da RIS. A configuração da RIS se dá pelo ajuste das defasagens dos elementos de maneira eficiente e adaptativa, mesmo em cenários complexos como canais de banda larga ou com mobilidade do usuário. Apesar de a RIS ainda estar em fase de pesquisa e desenvolvimento, já existem estudos que demonstram sua eficácia. Por exemplo, medições reais foram realizadas, confirmando que uma RIS baseada em metamateriais pode melhorar significativamente a cobertura e a eficiência do desempenho das comunicações sem fio, especialmente para 5G FR2 (5G FR2, *Fifth Generation of Mobile Networks – Frequency Range 2*) [4]. Esses resultados são promissores, indicando que a aplicação de RIS pode solucionar desafios críticos enfrentados em redes de comunicação modernas, como a melhoria da capacidade e o aprimoramento das condições de propagação do sinal.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: a Seção III introduz os princípios das superfícies reconfiguráveis e suas origens; a Seção IV explora os resultados de uma simulação envolvendo a interação entre duas ondas senoidais, com foco em suas somas, defasagens e nos princípios da combinação coerente de sinais, e, por fim, a Seção V conclui o trabalho.

II. PRINCÍPIOS DAS SUPERFÍCIES RECONFIGURÁVEIS

Neste artigo, é abordado os dois aspectos fundamentais para o avanço das redes de comunicação sem fio: a importância da LOS e a evolução das RISs. Primeiramente, discutimos o conceito de LOS, destacando sua relevância para a propagação eficiente de sinais eletromagnéticos em sistemas como redes celulares, micro-ondas e *Wi-Fi* de longo alcance. Em seguida, exploramos a origem e o desenvolvimento das RISs, tecnologias inovadoras que surgiram a partir de pesquisas com materiais adaptativos e metamateriais, capazes de manipular dinamicamente ondas eletromagnéticas. Essas superfícies reconfiguráveis têm se mostrado promissoras para superar desafios como sombreamento e limitações de alcance,

contribuindo para a otimização das redes de comunicação modernas. A seguir, detalhamos esses tópicos, apresentando uma visão abrangente sobre como a LOS e as RISs impactam a eficiência e a qualidade das transmissões sem fio.

A. Definição da linha de visada direta

A LOS é um conceito crucial em sistemas de comunicação sem fio, como redes celulares e sistemas de radar. Ela se refere à condição em que o sinal eletromagnético viaja diretamente de um ponto de transmissão (AP, *Access Point*) para um ponto de recepção, ou UE, sem obstáculos significativos no trajeto. Para que essa condição se mantenha, é necessário que o caminho do sinal entre os dois pontos esteja livre de obstruções físicas que possam causar atenuação ou distorção no sinal. Nesse cenário ideal, o sinal se propaga em linha reta, ou seja, sem ser desviado, difratado ou espalhado por obstáculos como edifícios, casas, árvores ou outros objetos [1].

A LOS é um fator importante para garantir a qualidade da comunicação, pois quando o sinal viaja sem obstruções ele minimiza a redução de sua intensidade. Em contraste, quando o sinal encontra barreiras físicas, ele pode enfrentar fenômenos como reflexões, refrações e difrações. Esses fenômenos podem distorcer o sinal e consequentemente degradar a qualidade da comunicação. Em sistemas de comunicação sem fio, a LOS permite uma maior largura de banda e uma menor latência, pois o sinal não sofre distorção e segue o caminho de menor distância, respectivamente.

Um exemplo de LOS pode ser observado em sistemas de comunicação ponto-a-ponto, como os usados em redes de micro-ondas ou sistemas de *Wi-Fi* de longo alcance. Imagine um link de comunicação sem fio entre duas torres de micro-ondas, uma em um prédio alto e outra em outro ponto elevado, como uma colina distante. Se não houver obstáculos como montanhas, árvores ou outros prédios entre as torres, o sinal poderá propagar-se em uma linha de visada direta entre os dois pontos. No entanto, caso um edifício seja construído entre as duas torres, isso pode bloquear o caminho direto do sinal. Desta forma, uma zona de sombra ou uma interferência é criada, resultando em perda de sinal ou redução da qualidade da comunicação. Sendo assim, soluções como antenas direcionais ou a RIS poderiam ser usadas para contornar a obstrução e restaurar a qualidade do sinal. Portanto, a LOS é uma condição ideal para a propagação de sinais eletromagnéticos e sua presença é um fator determinante para a eficiência das redes de comunicação modernas. A figura 1 seguir demonstra um obstáculo bloqueando a LOS de um UE.

B. Origem das Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis

Os princípios de construção das RISs têm suas origens em pesquisas relacionadas a materiais que alteram suas propriedades físicas em resposta a estímulos externos, como variações de temperatura ou campos elétricos. Primordialmente, esses materiais são as ligas com memória de forma. Essas ligas possuem a capacidade de alterar sua estrutura quando expostas a determinados fatores, retornando à sua forma original após a remoção do estímulo. Essas pesquisas começaram a ser realizadas nas décadas de 1960 e 1970, quando pesquisadores

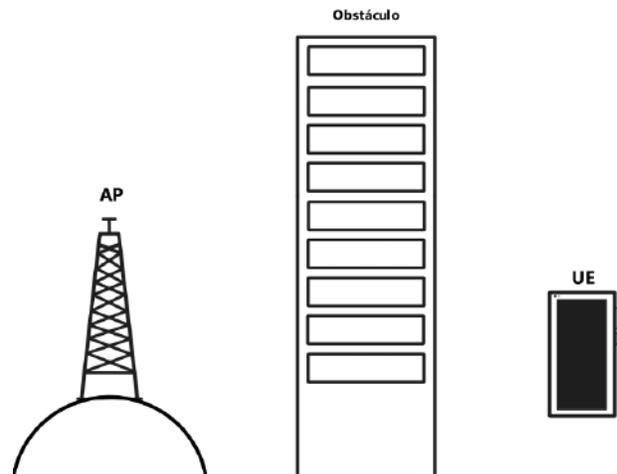


Fig. 1. LOS entre um AP e um UE obstruído por um obstáculo.

começaram a explorar a ideia de materiais adaptativos. Materiais esses projetados para responder a estímulos externos e modificar suas características mecânicas, térmicas e elétricas [5].

Consequentemente, durante as décadas de 1990 e 2000, as pesquisas sobre metamateriais começaram a ser amplamente exploradas [6]. Esses metamateriais possibilitam a manipulação de ondas eletromagnéticas de maneiras inovadoras, permitindo o controle da propagação de sinais de rádio, micro-ondas e luz de maneira mais eficiente. Esse avanço foi crucial para a introdução das RISs, que utilizam elementos estruturais interconectadas, isto é, elementos de meta-superfície, para manipular e controlar as ondas eletromagnéticas de maneira dinâmica.

Já na década de 2010, as RISs começaram a ser estudadas no contexto das redes de telecomunicações, especialmente devido à crescente demanda por redes sem fio mais eficientes, como preconizado pelo 4G (4G, *Fourth Generation of Mobile Networks*) [7]. As RISs foram inicialmente propostas para melhorar a cobertura de redes sem fio, resolvendo problemas como sombreamento e limitações de alcance. Também começaram a ser empregadas no desenvolvimento de antenas e refletores inteligentes; cujas características poderiam ser ajustadas dinamicamente para otimizar a transmissão de sinais em tempo real, sem a necessidade de expandir a infraestrutura tradicional das redes sem fio.

III. PRINCÍPIOS DA COMBINAÇÃO COERENTE DE SINAIS

A RIS promove a combinação coerente de sinais no receptor ou UE através do controle de fase das ondas eletromagnéticas refletidas. Ao defasar apropriadamente os sinais propagados por diferentes percursos, a RIS garante que as ondas se combinem de forma construtiva na UE. Desta forma, a potência do sinal recebido é maximizada, o que por outro lado significa que combinações destrutivas entre os sinais são minimizadas. Para isso, a RIS se vale de algoritmos de otimização [2, 3] para calcular as defasagens em cada um dos seus elementos. Sendo assim, a RIS é capaz de auxiliar na recepção de sinais em cenários com ausência de LOS, sendo especialmente relevante

para aplicações em redes 5G e Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*).

Para entender os princípios de funcionamento da RIS, é fundamental compreender o princípio da soma coerente de sinais. Para trazer luz a este aspecto, considere o seguinte exemplo introdutório: quando dois ou mais sinais senoidais de mesma frequência são combinados ou somados, isso gera um sinal resultante, s_r , cuja amplitude depende da diferença de fase entre os sinais somados. Mais especificamente, essa combinação de sinais pode ser descrita por

$$s_r = \sum_{\forall i} \text{sen}(2\pi f + \phi_i), \quad (1)$$

onde $i = \{0, 1, \dots, I\}$, $2\pi f$ é a frequência angular e ϕ_i é a i -ésima fase inicial. Portanto, se os sinais estiverem em fase ($\phi_i = \phi_{i+1}, \forall i$), suas amplitudes se somam linearmente. Caso contrário, se os sinais estiverem defasados ($\phi_i \neq \phi_k, k \neq i$), essa soma pode resultar em interferência destrutiva, reduzindo ou até cancelando a amplitude do sinal resultante. Esse fenômeno é bastante comum no estudo de ondas harmônicas e pode ser utilizado para obter uma visualização inicial acerca do funcionamento da RIS.

A Figura 2 ilustra esse conceito, simulando a soma de dois sinais ($I = 2$) senoidais com diferentes defasagens por meio de uma simulação computacional escrita em Python. Observe que

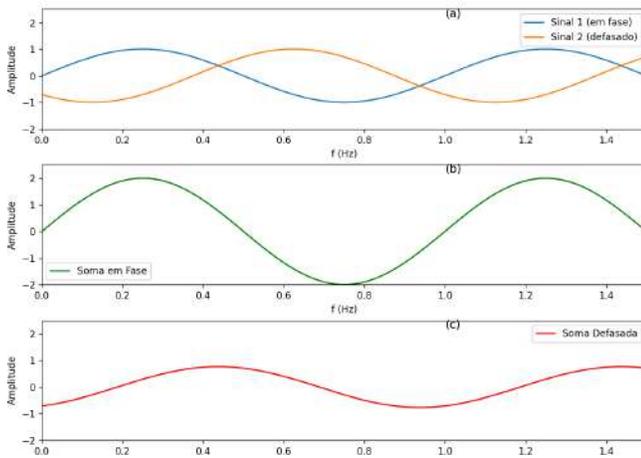


Fig. 2. Simulações das duas senoides com diferentes defasagens.

a Figura 2 apresenta três cenários distintos. Na Figura 2(a), são mostrados os sinais senoidais s_1 e s_2 com a mesma frequência angular e amplitude, porém com fases iniciais diferentes: $\phi_0 = 0$ e $\phi_1 = -3\pi/4$. Na Figura 2(b), a combinação coerente dos sinais em fase ($\phi_0 = \phi_1$) é ilustrada como referência. Note que a soma coerente de sinais resulta em um sinal com amplitude dobrada (combinação construtiva), como esperado. Por fim, na Figura 2(c), é demonstrado o sinal resultante da soma $s_r = s_1 + s_2$, no qual se observa que a combinação de sinais defasados entre si resulta em um sinal com amplitude reduzida (combinação destrutiva). Em outras palavras, quando os sinais estão em fase seus picos e vales coincidem, resultando em uma maior amplitude para o sinal resultante. Por outro lado, quando os sinais estão defasados os picos de um sinal podem coincidir com os vales do outro, reduzindo ou cancelando a amplitude resultante.

Como mencionado anteriormente, em ambientes urbanos densos a LOS entre um transmissor AP e o receptor UE pode estar obstruída por edifícios e outras estruturas. Quando isso ocorre, o sinal propagado por diferentes percursos pode chegar ao receptor com diferentes defasagens e intensidades, causando a interferência destrutiva e piorando a qualidade da comunicação. Sendo assim, a utilização da RIS tem se mostrado uma solução eficiente para controlar a combinação coerente de sinais no receptor [3]. Com essa capacidade de ajuste dinâmico, a RIS pode ser posicionada de forma estratégica para melhorar a potência do sinal no receptor, mesmo quando o caminho direto é bloqueado como mostrado na figura 3. Com isso, a RIS faz com que os sinais refletidos por ela se alinhem com o sinal transmitido pelo canal ponto-a-ponto entre o AP e UE, de forma a maximizar a interferência construtiva. Isso ocorre porque a RIS pode modificar a fase dos sinais refletidos com uma vasta possibilidade de configurações.

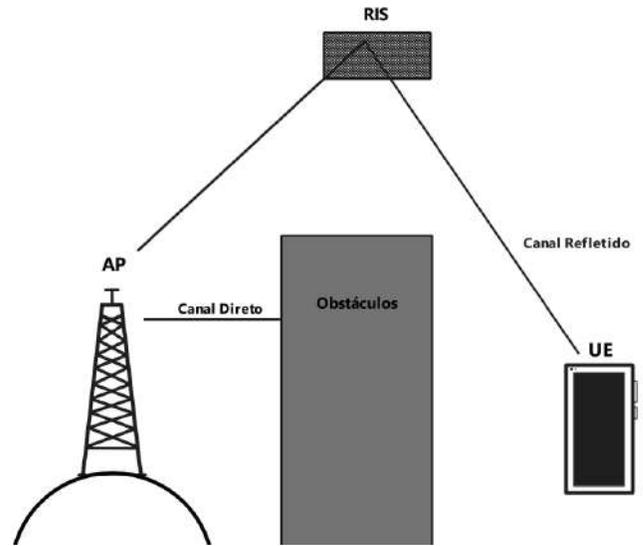


Fig. 3. RIS gerando canal refletido entre AP e UE.

Portanto, as RISs oferecem um grande potencial para otimizar a comunicação sem fio em ambientes urbanos densos. A capacidade de controlar dinamicamente a fase dos sinais refletidos permite não apenas melhorar a qualidade do sinal, mas também garantir a robustez e a eficiência das redes de comunicação sem fio. A aplicação de RISs é, sem dúvida, uma interessante alternativa para as futuras tecnologias de comunicação sem fio.

IV. CONCLUSÃO

As RISs surgiram como uma solução inovadora para os desafios de comunicação em ambientes sem LOS, onde obstáculos físicos e distâncias comprometem a propagação adequada dos sinais. Originadas de avanços em materiais inteligentes e nanotecnologia, as RISs controlam dinamicamente a fase dos sinais refletidos, otimizando a propagação e aprimorando a qualidade do sinal recebido. De fato, estudos recentes e medições práticas confirmam a eficiência da RIS, destacando seu potencial para integrar as redes sem fio do futuro.

Neste trabalho, simulações computacionais demonstraram, em princípio, como a combinação construtiva maximiza a

potência do sinal, enquanto a destrutiva é minimizada. Sendo assim, para trabalhos futuros serão desenvolvidas simulações mais sofisticadas, com o intuito de integrá-las a uma plataforma gráfica. Nessa plataforma, serão modelados múltiplos cenários de propagação de sistema de comunicações que incluem a RIS. Essa plataforma permitirá analisar cenários complexos, com variações de posicionamento, mobilidade do receptor e diferentes configurações da RIS, gerando dados acessíveis para o estudo desses sistema de comunicações.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos da MCTIC, concessão núm. 01245.010604/2020-14, pelo projeto Brasil 6G; e pelo projeto XGM-AFCCT-2024-2-15-1 apoiado pelo xGMobile – EMBRAPII Inatel Competence Center em redes móveis 5G and 6G, com recursos financeiros provenientes da PPI IoT/Manufatura 4.0 da MCTI concessão núm. 052/2023, assinado com a EMBRAPII; e pelo projeto Samurai financiado pela FAPESP (concessão núm. 20/05127-2); e pela FAPEMIG sob o contrato núm. PPE-00124-23; e pela CNPq-Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] Dayan Adionel Guimarães. *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. DOI: [10.1007/978-3-642-01359-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01359-1).
- [2] Emil Björnson, Henk Wymeersch, Bho Matthiesen, Petar Popovski, Luca Sanguinetti e Elisabeth de Carvalho. "Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications". Em: *IEEE Signal Process. Mag.* 39.2 (2022), pp. 135–158. DOI: [10.1109/MSP.2021.3130549](https://doi.org/10.1109/MSP.2021.3130549).
- [3] Pedro H. C. de Souza, Masoud Khazaei e Luciano Leonel Mendes. "Resource-Efficient Configuration of RIS-Aided Communication Systems Under Discrete Phase-Shifts and User Mobility". Em: *IEEE Transactions on Communications* 73.1 (2025), pp. 145–157. DOI: [10.1109/TCOMM.2024.3432690](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2024.3432690).
- [4] Marcus Figueiredo. *Rohde & Schwarz e Greenerwave colaboram para verificar módulos RIS e impulsionar pesquisas 6G*. URL: https://www.manufaturadigital.com/rohde-schwarz-pesquisas-6g/?utm_source=chatgpt.com (acesso em 04/10/2023).
- [5] Christian LExcellent. *Shape-Memory Alloys Handbook*. Ind. Wiley Online Books, 2014. ISBN: 9781848214347 , 9781118577776.
- [6] Wikipedia. *History of Metamaterials*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_metamaterials?utm_source=chatgpt.com.
- [7] Diego Araujo Reis César Ricardo Siqueira Bolaño. *Banda larga, cultura e desenvolvimento*. URL: https://www.scielo.br/j/neco/a/9z3X3gdwT7h6k6yWyjkrxSL/?utm_source=chatgpt.com/ (acesso em 30/03/2024).

AUTORES

John Nunes Sugahara Graduando no sexto período de Engenharia de Software pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), bolsista na Iniciação científica do xGMobile e no grupo de desenvolvimento de jogos OctoDevs. Concluiu iniciação científica no projeto Programação 1.0 em 2023. Seus interesses incluem: desenvolvimento de



software, programação back e front end, IA e desenvolvimento de jogos.

Pedro H. C. de Souza concluiu o curso de Técnico em Telecomunicações pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa (ETE FMC) em 2009. Graduado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) em 2015. Obteve o título de Mestre em Telecomunicações também pelo INATEL em 2017 e concluiu o doutorado pela mesma instituição em 2022. Atualmente encontra-se no programa de pós-doutorado promovido pela FAPESP e INATEL. Breve experiência no desenvolvimento de soluções de teste para software/hardware. Seus interesses incluem: sistemas de comunicações digitais, 6G, IA em telecomunicações, superfícies inteligentes, otimização convexa em telecomunicações e hardware/firmware embarcado.



Luciano Leonel Mendes



possui os títulos de Bacharel em Engenharia Elétrica e Mestre em Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), obtidos em 2001 e 2003, respectivamente. Ele concluiu o Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em 2007. Desde 2001 é

professor do Instituto Nacional de Telecomunicações, onde atua no ensino de graduação e pós-graduação. Foi coordenador de diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento, merecendo destaque aqueles voltados para TV Digital com apoio da Finep e RNP. Entre 2013 e 2015 ele executou um projeto de pós-doutorado, com o apoio do CNPq, na Vodafone Chair Mobile Communications Systems, localizada na Technische Universität Dresden, Alemanha, na área de esquemas de modulação digital para a quinta geração de redes móveis celulares. Hoje ele coordena as atividades de pesquisa do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), sendo o responsável pelas pesquisas em 5G neste projeto. Suas principais áreas de atuação são comunicações móveis, radiodifusão digital e modulações com múltiplas portadoras.

Técnicas de Múltiplo Acesso Associadas ao Uso de Inteligência Artificial para as Redes Móveis de Sexta Geração

Matheus Braga Teixeira, Daniely Gomes Silva, Mariana Baracat de Mello, Luciano Leonel Mendes
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
matheus.braga@get.inatel.br, daniely@inatel.br, mariana.baracat@inatel.br, lucianol@inatel.br

Abstract—The Sixth Generation (6G) of mobile networks is driven by applications that will require higher transmission rates, high reliability, and low latency. The use of Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) techniques has stood out in this context, providing greater capacity and spectral efficiency compared to Orthogonal Multiple Access (OMA) approaches. However, there is increased complexity in NOMA receivers due to inter-user interference. This paper addresses the use of Artificial Intelligence (AI) to mitigate the challenges encountered in NOMA schemes. The structure of the paper comprises an analysis of OMA and NOMA techniques, highlighting their functionalities, advantages, and disadvantages. Additionally, various studies involving the collaborative action of AI and non-orthogonal multiple access techniques will be presented.

Keywords—OMA, NOMA, 6G, Multiple Access, AI.

Resumo—A sexta geração (6G) de redes móveis é impulsionada por aplicações que demandarão taxas de transmissão mais elevadas, alta confiabilidade e baixa latência. A utilização de técnicas *Non-orthogonal Multiple Access* (NOMA) tem se destacado nesse contexto, proporcionando maior capacidade e eficiência espectral quando comparado às abordagens *Orthogonal Multiple Access* (OMA). No entanto, verifica-se uma maior complexidade dos receptores NOMA, devido à interferência inter-usuário. Neste artigo será abordado o uso da *Artificial Intelligence* (AI) com o objetivo de mitigar as dificuldades encontradas nos esquemas NOMA. A estrutura do artigo compreende uma análise das técnicas OMA e NOMA, destacando suas funcionalidades, vantagens e desvantagens. Além disso, serão apresentados diversos estudos que envolvem a ação conjunta entre AI e técnicas de múltiplo acesso não-ortogonais.

Palavras-Chave—OMA, NOMA, 6G, Múltiplo Acesso, IA.

I. INTRODUÇÃO

As aplicações previstas para a sexta geração (6G) de redes móveis exigirão taxas de transmissão ainda mais elevadas, alta confiabilidade e baixa latência [1]. Esses requisitos serão fundamentais para viabilizar tecnologias como projeções holográficas, que envolvem a criação de imagens tridimensionais interativas, e Internet tátil, que consiste na interação entre homem e máquina com a possibilidade de sensações táteis quase que em tempo real [2]. Além disso, a realidade virtual e aumentada necessitará de uma conexão estável e de baixa latência para proporcionar experiências imersivas. Os sistemas de transporte inteligente também necessitarão de comunicação ultra confiável para coordenar veículos e equipamentos [2]. Para isso ser possível, as redes 6G deverão superar as limitações como latência, velocidade de transmissão de dados

e eficiência energética das redes móveis de quinta geração (5G) [3]. Para a futura rede móvel espera-se que a cobertura se estenda não apenas à superfície terrestre, mas também a áreas marítimas e aéreas, ampliando ainda mais o alcance da conectividade [4].

Para atender as altas demandas de volume de dados, a eficiência espectral das redes 6G precisa ser significativamente melhorada [5]. Uma abordagem para atingir taxas de dados mais altas é otimizar a transmissão de sinais através de técnicas *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA). Os esquemas NOMA quando comparados aos esquemas *Orthogonal Multiple Access* (OMA) convencionais têm se mostrado mais eficazes para aumentar a capacidade e eficiência espectral, uma vez que estes esquemas suportam uma quantidade maior de usuários para um determinado número de recursos disponíveis, como o tempo, frequência ou domínio de código. No entanto, o receptor precisa lidar com uma maior complexidade, devido à *Inter-User Interference* (IUI) que é inserida no sinal [6]–[10].

Em vista disso, neste artigo é analisado como a *Artificial Intelligence* (AI) pode ser empregada como técnica viabilizadora destes esquemas para reduzir a complexidade. Os algoritmos de AI também podem ser utilizados para melhorar a detecção dos dados e a confiabilidade do sistema [11]–[14].

O artigo é estruturado da seguinte forma: Seção II aborda as técnicas OMA, como *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), *Time Division Multiple Access* (TDMA), *Code Division Multiple Access* (CDMA) e *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA). Seção III descreve as principais técnicas NOMA, como *Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access* (PD-NOMA), *Pattern Division Multiple Access* (PDMA), *Interleave Division Multiple Access* (IDMA) e *Multiple-user shared access* (MUSA). Nessas duas seções são demonstradas suas funcionalidades, vantagens e desvantagens. Seção IV apresenta uma breve introdução sobre as técnicas de AI, Seção V descreve a AI aplicada às técnicas de múltiplo acesso não ortogonais e Seção VI traz as conclusões sobre este trabalho.

II. ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS

Nas últimas décadas, os sistemas de comunicação sem fio passaram por um desenvolvimento significativo no que diz respeito às técnicas de múltiplo acesso, uma peça central para a evolução desses sistemas, desde as primeiras gerações até

a quarta geração de redes móveis. Neste contexto, diversas tecnologias de múltiplo acesso foram adotadas, como: FDMA [15]–[17], TDMA [18]–[20], CDMA [21]–[23] e OFDMA [24]–[26]. Essas tecnologias implementadas, respectivamente, para a primeira geração (1G), segunda geração (2G), terceira geração (3G) e quarta geração (4G) de redes móveis, são definidas como técnicas OMA.

O OMA é um esquema que aloca os usuários em recursos ortogonais, tais como frequência, tempo ou código, permitindo que os dados dos usuários sejam detectados separadamente, por meio de receptores de baixa complexidade [5].

Contudo, um dos desafios enfrentados pelo OMA é a restrição imposta pelo número limitado de recursos ortogonais disponíveis. Além disso, as imperfeições introduzidas pelo canal frequentemente comprometem essa propriedade de ortogonalidade. Essa situação se destaca quando dois sinais ortogonais são transmitidos através de canais dispersivos. A dispersão no sinal ocorre quando as suas diversas componentes de frequência se propagam com velocidades diferentes, resultando em um espalhamento desse sinal. Como consequência, os sinais perdem sua propriedade de ortogonalidade devido aos efeitos de espalhamento temporal ou na frequência. Essa dispersão pode ocorrer devido aos vários fatores, como multipercurso, reflexões em obstáculos, difração, entre outros fenômenos que afetam a propagação do sinal [5]. Nas seções II-A, II-B, II-C e II-D são apresentadas brevemente diferentes técnicas OMA.

A. Frequency Division Multiple Access

O FDMA foi introduzido nas décadas de 1950 e 1960 como um avanço para compartilhamento de canais de frequência em sistemas de comunicação. Seu uso inicialmente foi empregado em telefonia fixa e depois se estendeu para os primeiros sistemas de redes móveis [27]. A técnica FDMA fragmenta a largura de banda disponível em faixas estreitas de frequência, alocando cada uma exclusivamente a um usuário durante sua sessão de conexão. Ao dedicar um subcanal a cada usuário, garante-se que a banda esteja disponível continuamente para o mesmo, indicando que o recurso de comunicação seja compartilhado apenas na dimensão de frequência [28]. A Figura 1 [29] ilustra a técnica FDMA.

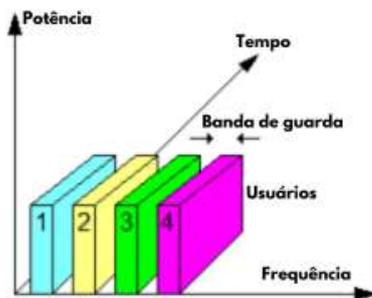


Fig. 1. Ilustração da alocação de recurso na técnica FDMA [29].

Durante a transmissão do FDMA, cada *User Equipment* (UE) utiliza uma parcela específica de frequência para enviar informações à *Base Station* (BS). Essa alocação ocorre em

diferentes partes do espectro disponível, permitindo que os UE transmitam ao mesmo tempo sem interferência, pois cada um opera em sua faixa de frequência designada. Já na recepção, cada UE ajusta seu receptor na frequência alocada para receber os dados transmitidos da BS [27].

No sistema FDMA, a largura de banda atribuída a cada usuário é determinada pela taxa de dados e pelo esquema de modulação utilizados. A largura de banda total do sistema é representada como $B_s = KB$, em que K representa o número de canais e $B = \alpha(R_b/k)$ é a largura de banda por canal, sendo α o fator de decaimento do filtro, R_b a taxa de bits e k o número de bits por símbolo e sem levar em consideração as bandas de guarda [28]. Ao considerar as bandas de guarda, a expressão modificada é a seguinte

$$B_s = K(B + B_g) \quad (1)$$

sendo B_g a largura da banda de guarda.

Algumas das principais vantagens associadas a técnica FDMA são:

- A alocação de recurso é simplificada pois cada usuário é atribuído a uma faixa de frequência fixa [30].
- Mesmo em transmissões em ambientes com múltiplos percursos, a probabilidade de interferência entre usuários é reduzida, o que proporciona uma transmissão mais eficaz [30].
- A baixa potência de transmissão contribui significativamente para a economia de energia e para a eficiência energética [30].

Porém, o FDMA possui desvantagens como:

- Quantidade restrita de recursos ortogonais. Portanto, quando a quantidade de usuários é alta, pode ocorrer congestionamento e competição por recursos, aumentando a latência do sistema [28].
- A eficiência espectral é reduzida devido à presença de bandas de guarda [30].

B. Time Division Multiple Access

O TDMA foi desenvolvido nas décadas de 1970 e 1980, para ser adotado em sistemas digitais [31]. TDMA é uma técnica que faz multiplexação no domínio do tempo em que uma portadora é subdividida em períodos sucessivos de tempo denominados *time slots*. Nesta técnica, cada usuário é designado a um *slot* de tempo para a transmissão de seus dados. Isso viabiliza o compartilhamento de um mesmo canal por diversos usuários, permitindo que cada um utilize um intervalo de tempo específico. Na Figura 2 [29], é possível observar que cada usuário poderá usufruir de toda a largura de banda da frequência, mas apenas durante uma fração de tempo [30].

A taxa de bits do sistema, representada por R_{bs} , é a velocidade na qual cada usuário transmite ao acessar o canal. Desconsiderando os tempos de guarda, a taxa de dados por usuário é denotada por $R_b = R_{bs}/K$. Ao considerar os tempos de guarda, o tempo alocado por canal é indicado por $T = (T_f/K) - T_g$, com T_f , K e T_g representando a duração do quadro, o número de *time slots* e o tempo de guarda, respectivamente. A taxa de dados por canal é calculada

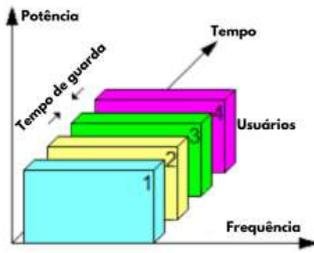


Fig. 2. Ilustração da alocação de recurso na técnica TDMA [29].

pela divisão do número de bits transmitidos por usuário pela duração do quadro [28]

$$R_b = \frac{\left(\frac{T_f}{K} - T_g\right) R_{bs}}{T_f} \quad (2)$$

É evidente que um tempo de guarda curto é necessário para aprimorar a eficiência do sistema. No entanto, aplicações práticas impõem um limite mínimo para a duração de T_g , que dependem das características específicas do sistema [28]. Dessa forma, a largura de banda do sistema está diretamente relacionada à sua taxa de dados.

Na recepção, os dispositivos recebem os sinais e os separam conforme os *slots* estão reservados para cada um, permitindo que recupere os dados [28]. Vários padrões de comunicação móvel, como o *Global System for Mobile Communication* (GSM) 2G e o *General Packet Radio Service* (GPRS) 2.5G, utilizam o TDMA como o método para o múltiplo acesso [28].

O TDMA apresenta as seguintes vantagens:

- Proporciona taxas de transmissão superiores as taxas do FDMA, uma vez que a alocação de *slots* de tempo para cada usuário evita conflitos [30].
- Devido à implementação de circuitos lógicos de alta velocidade e processadores com taxas de dados elevadas, os sistemas TDMA proporcionam uma maior adaptabilidade para se ajustarem a diversas condições e requisitos operacionais em ambientes de comunicação [28].
- Conseguem lidar com níveis mais elevados de ruído de interferência devido à sua abordagem de divisão de tempo [28].
- Bom aproveitamento de multiplexação durante períodos de tráfego em rajada [30].

Entretanto, a técnica TDMA possui algumas desvantagens, como:

- Vulnerável às variações causadas pela propagação em múltiplos percursos [30].
- Exige um planejamento de frequências mais elaborado, o que aumenta a complexidade do sistema [30].
- Para transmissão é preciso alta potência e maior energia, o que não é energeticamente vantajoso [30].

C. Code Division Multiple Access

O CDMA foi proposto nas décadas de 1980 e 1990, para otimizar os sistemas de redes móveis [32]. Como visto nas subseções II-A e II-B, o número de canais ou intervalos de

tempo em um sistema específico é fixo nas estratégias FDMA, onde um único canal é designado a um único usuário durante o período de comunicação. Já no TDMA todos os canais são designados a um único usuário durante um intervalo de tempo. No entanto, à medida que a variedade de serviços se expande, a alocação fixa de canal mostra-se ineficaz na utilização do espectro escasso, pois há uma limitação de faixas de frequência disponíveis para acomodar a crescente demanda por serviços, especialmente com o aumento exponencial do número de usuários. Com isso, o CDMA consiste em uma técnica por divisão de código em que dissemina as informações do usuário, originalmente em uma banda estreita, por uma extensão de espectro muito mais ampla [28], conforme mostrado na Figura 3 [29].

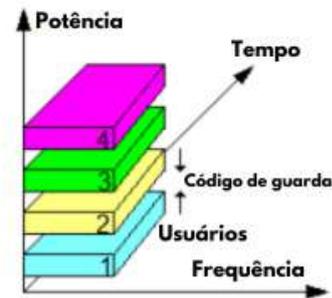


Fig. 3. Ilustração da alocação de recursos na técnica CDMA [29].

A técnica CDMA é capaz de transmitir dados de vários usuários na mesma faixa de frequência sem um aumento significativo da complexidade de detecção, durante todo o intervalo de tempo. Isso ocorre desde que cada usuário empregue códigos distintos ortogonais, e o código de espalhamento utilizado seja conhecido pelo receptor. Na etapa de recepção, os dados são recuperados de um sinal que se assemelha ao ruído térmico de fundo do canal. Isso ocorre devido ao espalhamento espectral cuja as sequências utilizadas são conhecidas como sequência de espalhamento. O receptor possui o conhecimento do código associado à comunicação específica que está sendo decodificada [27]. No CDMA, o número de usuários não é fixo, permitindo a adição de novos usuários ao sistema [28].

Algumas vantagens do sistema CDMA são:

- Permite que vários usuários dividam a mesma faixa de frequência simultaneamente [30].
- Assim como o FDMA, este esquema possui transmissão com baixa potência e é robusto em situações com múltiplos percursos de propagação [30].

Em contrapartida, este esquema possui desvantagens, como:

- A capacidade do sistema é limitada devido à interferência de múltiplo acesso [30].
- Em situações de alta demanda, a taxa de transmissão pode diminuir, impactando negativamente a qualidade do serviço [30].

D. Orthogonal Frequency Division Multiple Access

O OFDMA foi apresentado no início dos anos 2000, com o objetivo de superar as limitações encontradas nas técnicas

anteriores [32]. Ao contrário de métodos mais tradicionais, como o FDMA, TDMA e CDMA que operam com alocação estática de recursos, o OFDMA traz uma abordagem flexível e ajustável, pois divide a largura de banda total em subportadoras ortogonais. Isso possibilita a alocação dinâmica e adaptativa de recursos. As subportadoras podem ser adaptadas individualmente, permitindo uma otimização da modulação e codificação com base nas condições específicas do canal [28]. A técnica OFDMA é uma forma de Frequency Division Multiplexing (FDM) e uma estratégia de Multiple Carrier Modulation (MCM), conforme ilustrado na Figura 4 [28].

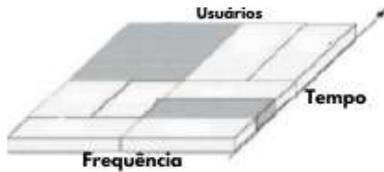


Fig. 4. Ilustração da alocação de recursos aos usuários na técnica OFDMA [28].

Os usuários enviam seus dados por meio de conjuntos de subportadoras que são mutuamente ortogonais. Esses conjuntos de subportadoras são chamados de *Resource Block* (RB). A largura de banda de cada subportadora e o número de subportadoras por RB dependem do sistema [8] [28]. Na transmissão de *uplink* em redes móveis, onde os dispositivos enviam dados para a BS, a alocação dinâmica de subportadoras permite que a BS ajuste a largura de banda conforme necessário para cada dispositivo. Cada UE é designado para transmitir em uma ou mais dessas subportadoras, com base nos requisitos específicos de largura de banda e qualidade de serviço. Para assegurar a eficácia do sistema, é crucial que os UEs transmitam seus sinais de maneira sincronizada no tempo e a frequência de transmissão deve estar perfeitamente alinhada com as subportadoras designadas. Já no *downlink*, a BS transmite dados para múltiplos dispositivos usando diferentes subportadoras, possibilitando uma comunicação eficiente e simultânea [33].

No *uplink* do OFDMA, as subportadoras podem sofrer deslocamentos de frequência acarretando na piora do desempenho do sistema. Para mitigar este problema, em [34] foi proposto um esquema híbrido de cancelamento de interferência multiusuário, denominado *Selective Parallel Interference Cancellation* (SPIC). O método utiliza múltiplos demoduladores OFDMA na BS para compensar os *Carrier Frequency Offsets* (CFOs) dos diversos usuários. Os resultados obtidos demonstraram que esse esquema oferece ganhos significativos de desempenho em relação às abordagens mais recentes. Já em [35], foi proposta uma arquitetura com vários demoduladores *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) para corrigir e compensar os efeitos adversos de CFOs no receptor. Os resultados da avaliação numérica também revelaram um ganho significativo de desempenho em comparação aos receptores convencionais.

Algumas vantagens do sistema OFDMA são:

- Este esquema opera na ideia de dividir a largura de banda em subportadoras ortogonais, tornando a estrutura do sistema simples e fácil de implementar [30].

- Cada subportadora carrega uma parte diferente da informação e não interfere uma na outra. Desse modo, os receptores de baixa complexidade podem lidar com cada subportadora independentemente [30].
- A divisão ortogonal permite uma flexibilidade significativa na alocação de banda [30].
- A possibilidade de transmissão simultânea de múltiplos sinais em diferentes subportadoras aumenta a eficiência espectral [30].

Entretanto, o OFDMA possui algumas desvantagens, como:

- Sensibilidade a desvios de frequência podem levar à interferência entre as subportadoras, prejudicando a qualidade do sinal e causando uma degradação do desempenho do sistema. Isso ocasiona um aumento em suas taxas de erro [30].
- Para se alcançar ortogonalidade é necessário um alinhamento preciso do sincronismo no tempo e na frequência [30].

Durante a evolução das diferentes gerações de redes móveis, as técnicas de múltiplo acesso foram escolhidas com base nos desafios e necessidades de cada período. No 1G, como o sistema era analógico e contava com uma pequena capacidade, o FDMA foi adotado devido sua simplicidade e facilidade de aplicação [31]. Com o avanço para o 2G, que tornou-se digital e com uma maior capacidade, foi necessário empregar a técnica TDMA, pois ela suporta um maior número de usuários simultâneos e tem uma melhor eficiência espectral [31]. Na transição para o 3G, surgiu a conexão com a internet e uma demanda na melhoria das taxas de transmissão. Com isso, foi implementada a técnica CDMA, uma vez que ela suporta serviços de dados mais avançados e possui uma eficiência espectral melhor que as técnicas anteriores [32]. Já o 4G precisou de uma melhora na latência e nas taxas de transmissão. Isso levou a introdução da técnica OFDMA, em razão dela dispor de uma maior flexibilidade na alocação de recursos [32]. O 5G, embora apresente menor latência e maior taxa de transmissão, continuou utilizando a técnica OFDMA, uma vez que ela atende os requisitos estabelecidos para o 5G [36]. No contexto do 6G, que ainda está em fase de pesquisa, as técnicas NOMA surgem como uma possível alternativa [37].

III. NON ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS

Com o crescente desenvolvimento das comunicações móveis e *Internet of Things* (IoT), surgem desafios relacionados à capacidade de suportar um número cada vez maior de dispositivos conectados. O OMA tradicional se depara com limitações inerentes de capacidade, uma vez que o número de usuários conectados é restrito pelo número de recursos ortogonais disponíveis [38]. Além disso, a alocação de recursos de largura de banda para usuários mais distantes da BS e canais atenuados, a fim de garantir altas taxas de transmissão total do sistema, resulta em uma eficiência espectral relativamente baixa. Portanto, o NOMA emerge como uma alternativa favorável para suprir as novas necessidades das redes de comunicações sem fio [38].

O NOMA multiplexa informações de usuários distintos no domínio do tempo ou da frequência, possibilitando o

compartilhamento eficiente de um único recurso de bloco (tempo, frequência e código). Essa abordagem proporciona benefícios essenciais, como maior eficiência do sistema, maior eficiência espectral para suportar a conectividade massiva de dispositivos 5G com transmissões esporádicas e uma melhor experiência para usuários nas extremidades de uma célula em redes de comunicação sem fio. Além disso, o NOMA proporciona um equilíbrio à distribuição de recursos entre os usuários para garantir uma experiência de serviço mais justa e equitativa, uma taxa de transmissão elevada, uma capacidade avançada para vários usuários. Tempos de transmissão rápidos, devido à sua capacidade de transmissão sem concessões e uma notável interoperabilidade com outras tecnologias de acesso, possibilita que o NOMA se torne uma solução promissora para atender às demandas cada vez mais complexas e exigentes das redes de comunicação modernas [39].

No entanto, no *downlink*, BS aloca recursos de transmissão, de forma não ortogonal entre os usuários. Ou seja, os usuários compartilham o mesmo recurso de transmissão, permitindo a sobreposição de sinais, como é possível verificar na Figura 5 [39], onde os sinais dos usuários U1 e U2 estão sobrepostos. Usuários localizados em áreas com condições de canal mais fracas podem receber níveis mais altos de potência para compensar a atenuação do sinal. Os dados a serem transmitidos são codificados e modulados para se adequarem ao esquema de multiplexação não ortogonal. Cada usuário recebe um sinal modulado exclusivo, adaptado à sua alocação de recursos e níveis de potência específicos. No lado do receptor, técnicas avançadas de processamento de sinal, como o *Successive Interference Cancellation* (SIC), são utilizadas para separar os sinais sobrepostos e recuperar os dados de cada usuário individualmente. O SIC decodifica os sinais em uma sequência ordenada, começando pelo sinal mais forte e removendo-o antes de decodificar os sinais mais fracos [39].

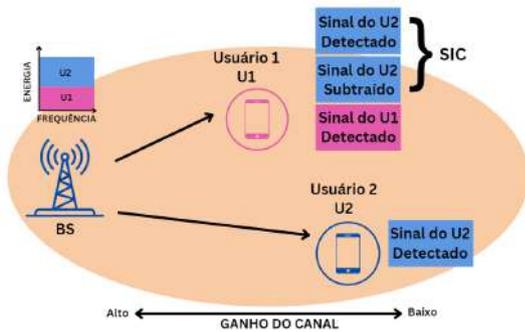


Fig. 5. Cenário de *downlink* NOMA [39].

No *uplink*, os dispositivos dos usuários codificam e modulam os dados que desejam enviar para a BS. Cada dispositivo celular modula seus dados com um esquema de modulação específico, adaptado à alocação de recursos e níveis de potência determinados. Os sinais modulados de diferentes dispositivos celulares são transmitidos simultaneamente utilizando o mesmo recurso de transmissão. Na Figura 6 [39] é possível verificar o esquema NOMA de *uplink*. O usuário U1 que está mais próximo da BS, ou seja, que possui um sinal de maior potência é identificado primeiro. Dessa forma, seus dados são

detectados pela BS e sua interferência é cancelada do sinal recebido. Assim, os dados do usuário U2, posicionado a uma maior distância da BS e, portanto, com um sinal de menor potência, podem ser detectados pela BS. Na BS, técnicas como o SIC são utilizadas para separar os sinais sobrepostos e recuperar os dados individuais de cada usuário [39].

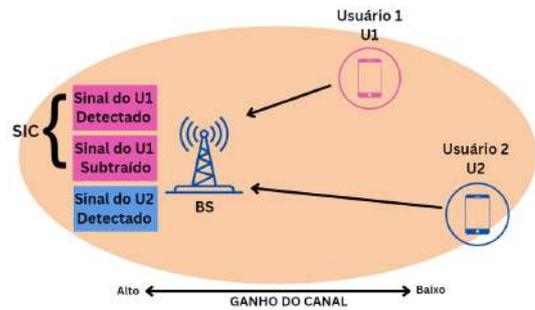


Fig. 6. Cenário de *uplink* NOMA [39].

No âmbito deste artigo, serão examinadas as principais técnicas de múltiplo acesso não ortogonal, como: PD-NOMA, PDMA, MUSA e IDMA, respectivamente.

A. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access

O PD-NOMA se baseia na premissa onde vários dispositivos compartilham simultaneamente o mesmo espectro de frequência e intervalo de tempo, diferenciando-se pela potência de transmissão. A alocação de potência é a chave para distinguir os sinais entre os usuários, permitindo uma simultaneidade eficiente.

Na Figura 7 é ilustrado um esquema PD-NOMA, considerando um cenário de *downlink* com dois usuários e uma BS. Observa-se que o usuário U2 está localizado próximo a BS, desfrutando assim de um canal menos atenuado. Enquanto isso, o usuário U1 encontra-se a uma distância maior da BS, resultando em um canal mais dispersivo [10], [40], [41].

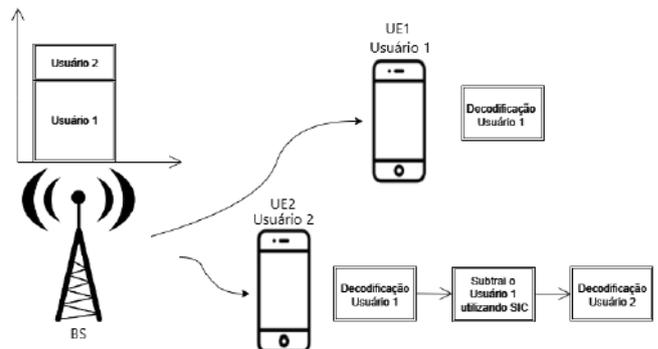


Fig. 7. Cenário de *downlink* de um sistema PD-NOMA.

Na etapa de *downlink*, os sinais destinados aos usuários são sobrepostos, sendo alocados com diferentes níveis de potência. A BS alocará mais potência ao usuário com maior perda de percurso, como indicado na Figura 7. O sinal transmitido pela

BS é dado por

$$X(i) = \sum_{i=1}^M \sqrt{P_i} x_i, \quad (3)$$

onde P_i representa a potência normalizada do usuário i , x_i é o sinal transmitido pelo i -ésimo usuário e M é o número total de usuários no sistema. A soma da potência atribuída a todos os usuários no sistema não pode exceder a potência total disponível para transmissão [10], [42], ou seja,

$$\sum_i P_i \leq P_t. \quad (4)$$

O sinal recebido Y pelo i -ésimo usuário, após passar pelo canal, pode ser determinado da seguinte forma,

$$Y_i = h_i X + n_i, \quad (5)$$

onde h_i é o ganho do canal do i -ésimo usuário, seguindo a ordem de ganho de $h_2 > h_1$, X é o sinal transmitido pela BS e n_i é *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) do i -ésimo usuário [42].

No receptor do usuário U2, o sinal proveniente do usuário U1 apresenta uma *Signal to Noise Ratio* (SNR) elevada por estar mais próximo da BS, possibilitando que o usuário U2 decodifique e remova com sucesso o sinal do usuário U1 por meio da técnica SIC antes de decodificar o seu próprio sinal. Por outro lado, no receptor do usuário U1, o sinal do usuário U2 é considerado como ruído, uma vez que sua potência é inferior à do usuário U1. Nesse contexto, o usuário U1 pode decodificar seu próprio sinal diretamente, sem a necessidade de aplicar o SIC [42].

No *uplink* com dois usuários, ambos transmitem seus sinais simultaneamente para a BS compartilhando o mesmo intervalo de tempo e canal de frequência. Os dois devem cooperar para transmitir seus sinais sob uma restrição de potência. A distribuição de potência entre os dois usuários é determinada com base nas condições do canal de cada um em relação à BS. Após o processo de transmissão, a BS recebe um sinal resultante da sobreposição dos sinais de ambos os usuários. Posteriormente, a BS emprega a técnica SIC, decodificando primeiro o sinal do usuário mais próximo em relação à BS e, em seguida, o do usuário de maior distância, permitindo assim a recuperação dos sinais individuais de ambos os usuários. O sinal recebido pela BS é dado por

$$X = \sum_{i=1}^M \sqrt{P_i} h_i x_i, \quad (6)$$

onde P_i é a potência do i -ésimo usuário, h_i é o ganho do canal do i -ésimo usuário e x_i é o sinal transmitido pelo i -ésimo usuário [10], [42], [43].

No estudo realizado em [10], foi analisado o desempenho de um sistema PD-NOMA em comparação ao sistema OMA, abrangendo uma avaliação da probabilidade de interrupção, taxa alcançável, eficiência espectral e eficiência energética. Em [44], os autores conduziram uma análise da curva de *Bit Error Rate* (BER) para dois usuários, considerando um cenário em que ocorre uma maior alocação de potência para um dos usuários em relação ao outro. Em [42] foi apresentado uma

investigação do desempenho de BER em cenários de *downlink* e *uplink* com a participação de quatro usuários. Além disso, em [45], os pesquisadores compararam o desempenho da taxa total entre um sistema PD-NOMA e um sistema OMA. Analisando os resultados apresentados nos trabalhos anteriores, nota-se que o sistema PD-NOMA supera o sistema OMA em eficiência espectral, eficiência energética e taxa total de transmissão.

O PD-NOMA apresenta diversas vantagens significativas na área de comunicação sem fio, como:

- Se destaca pelo aumento da eficiência espectral, pois otimiza a utilização do espectro de frequência, permitindo acomodar múltiplos dispositivos na mesma largura de banda, resultando em uma eficiência espectral superior [46], [47].
- Promove a justiça na distribuição de recursos, beneficiando dispositivos mais distantes da BS [46], [47].
- Capacidade de proporcionar conectividade massiva, o que se torna crucial, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas [46], [47].
- Permite a acomodação de um maior número de dispositivos em uma única célula de rede, atendendo às crescentes demandas por conectividade em ambientes altamente congestionados [46], [47].

No entanto, é importante reconhecer que a implementação do PD-NOMA também apresenta desafios significativos:

- Devido à natureza não ortogonal dessa abordagem, os dispositivos podem causar interferência uns aos outros, o que requer a aplicação de técnicas avançadas de cancelamento de interferência [46], [47].
- A implementação prática é complexa, envolvendo a utilização de algoritmos sofisticados, como o SIC, que resulta em requisitos computacionais substanciais, especialmente em cenários de alta densidade de usuários [46], [47].
- Na alocação de energia, tende a priorizar usuários que estão mais distantes da BS, visando melhorar suas taxas de transmissão de dados. No entanto, isso pode gerar interferência intracelular significativa, à medida que esses usuários começam a introduzir interferência entre células adjacentes na infraestrutura de rede NOMA de *downlink* [46], [47].

Portanto, embora o PD-NOMA ofereça benefícios notáveis, é essencial enfrentar e resolver os desafios relacionados à complexidade de implementação e à gestão da interferência intracelular para aproveitar ao máximo essa tecnologia [46], [47].

B. Pattern Division Multiple Access

A técnica PDMA é fundamentada na criação de padrões de usuário que são implementados tanto no transmissor quanto no receptor. Em vez de alocar canais ortogonais individualmente para cada usuário, o PDMA explora padrões de alocação de recursos projetados para facilitar a decodificação eficaz dos sinais transmitidos. Esse padrão refere-se a uma sequência específica no domínio da frequência ou código que é atribuída para cada usuário. Cada usuário recebe seu padrão para modular seus dados. Essa abordagem resulta em uma sobreposição inteligente que é transmitida no canal compartilhado [48]–[50].

No cenário de *uplink*, considera-se que tanto a BS quanto os usuários estão equipados com uma única antena, sem perda de generalidade. A BS recebe os sinais dos usuários e assim gera um vetor modulado após o padrão PDMA mapear o sinal x_k para recursos de elementos [51]. O detector multiusuário é utilizado na BS para remover dados interferência e decodificar os dados dos usuários. O sistema é composto por K usuários que são transmitidos pelo padrão PDMA g_k . Os padrões PDMA formam uma matriz padrão $N \times K$, onde N é o número de recursos de elementos. Essa matriz $G_{\text{PDMA}}^{[N,K]}$ é representada por

$$G_{\text{PDMA}}^{[N,K]} = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & \cdots & g_{1,K} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & g_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N,1} & g_{N,2} & \cdots & g_{N,K} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Cada usuário tem um padrão, representado por cada coluna na matriz (7). Assim, o padrão do k -ésimo usuário pode ser expresso por

$$g_k = \begin{bmatrix} g_{1,k} \\ g_{2,k} \\ \vdots \\ g_{N,k} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

A Figura 8 [52] ilustra o cenário de *uplink* na transmissão.

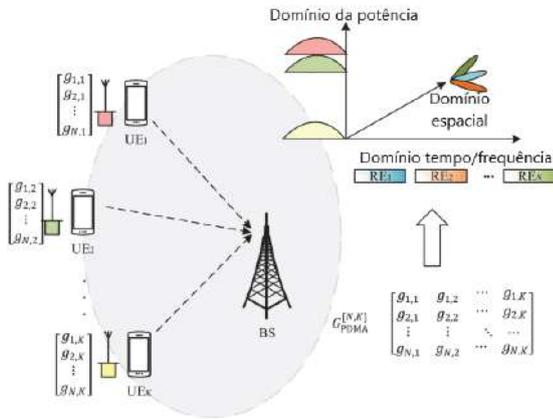


Fig. 8. Cenário de *uplink* PDMA [52].

O somatório dos sinais dos K usuários recebido na BS é dado por

$$Y_{BS} = \sum_{i=1}^K \text{diag}(h_k) g_k x_k + n_k \quad (9)$$

onde h_k é a resposta do canal do k -ésimo usuário, g_k será o padrão usado pelo k -ésimo usuário, x_k é o sinal do k -ésimo usuário, n_k representa o ruído AWGN. Y_{BS} , n_k e h_k são vetores com comprimento N e $\text{diag}(h_k)$ corresponde a uma matriz diagonal construída a partir de h_k [51].

No cenário do *downlink*, cada usuário tem seu padrão PDMA atribuído. Depois da aplicação da codificação PDMA,

fluxos de dados são combinados na BS e enviados simultaneamente. O sinal recebido pelo k -ésimo usuário pode ser representado da seguinte maneira

$$y_k = \text{diag}(h_k) \sum_{k=1}^K g_k x_k + n_k \quad (10)$$

A Figura 9 [51] ilustra o cenário de *downlink* na transmissão. Nota-se que todos os recursos de elementos são compartilhados por vários usuários. Por exemplo, no primeiro recurso de elemento, ele é compartilhado pelo UE₁, UE₃, UE₄ e UE₅.

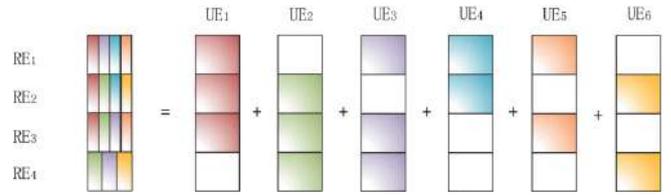


Fig. 9. Mapa de recursos de elementos no *downlink* [51].

A decodificação ocorre no receptor, utilizando uma técnica SIC para cancelar de forma eficaz a interferência de outros usuários. A ordem na qual a decodificação é realizada é crucial, uma vez que a correção de erros nos símbolos mais confiáveis é essencial para minimizar a propagação de erros. Decodificando o primeiro usuário errado, haverá uma propagação de erros para os próximos usuários. Outros decodificadores não lineares podem ser empregados, como *Maximum a Posteriori* (MAP) ou *Maximum Likelihood*, mas devido a sua complexidade elevada, não podem ser aplicados em sistemas práticos [53]–[55].

Em [52] foram realizadas comparações de *Block Error Rate* (BLER) entre as abordagens OMA e PDMA, bem como comparações entre um sistema NOMA convencional e *Sparse Code Multiple Access* (SCMA). Além disso, o estudo incluiu análises de desempenho para os modos de *downlink* e *uplink* dos sistemas PDMA. Os autores de [51] conduziram experimentos abrangendo comparações de taxas de transmissão entre PDMA e OMA, adaptando cenários variados em suas investigações. No trabalho apresentado em [54], os pesquisadores demonstraram a comparação das taxas de transmissão agregadas entre o esquema PDMA e o OMA convencional, bem como a avaliação de desempenho da BLER em diferentes níveis de sobrecarga. Eles detalharam os resultados obtidos em uma variedade de condições de sobrecarga. Em [55], os sistemas PDMA e OFDMA foram comparados, tanto para os modos de *uplink* quanto de *downlink*. Além disso, a pesquisa explorou o desempenho em diferentes padrões de matrizes PDMA. Os autores conduziram análises abrangentes, avaliando as capacidades de diferentes configurações de sistemas de comunicação. Analisando os resultados obtidos nos trabalhos citados anteriormente, observa-se que o PDMA conseguiu superar o desempenho comparado ao OMA nos testes como a taxa de transmissão, eficiência espectral e eficiência energética.

Algumas das principais vantagens associadas a técnica PDMA são:

- Capacidade de acomodar vários dispositivos, tornando-o adequado para aplicações de alta capacidade de tráfego [55].
- O uso do SIC proporciona desempenho próximo ao ideal com baixa complexidade de detecção, tornando-o prático para implementação [55].
- A abordagem de disparidade no PDMA facilita a rápida convergência do algoritmo de detecção, minimizando os efeitos de propagação de erros, tornando-o uma escolha eficaz para comunicação sem fio confiável e estável [55].

Porém, o PDMA possui desvantagens como:

- O desempenho do PDMA pode degradar, devido à limitação do SIC, em cenários de sobrecarga extrema [55].
- Exige informações precisas do canal, o que pode ser desafiador de obter em ambientes de comunicação dinâmica [55].
- Para garantir o funcionamento eficaz, é necessária uma coordenação avançada entre transmissores e receptores, o que pode aumentar a complexidade da implementação [55].

Portanto, é importante estar ciente de suas limitações em termos de desempenho em cenários de sobrecarga, requisitos de conhecimento do canal e necessidade de coordenação avançada [55].

C. Interleave Division Multiple Access

No final da década de 1990 surgiu a necessidade de equalizar canais multi-percurso e melhorar a detecção de múltiplos usuário em sistemas *Direct Sequence Code Division Multiple Access* (DS-CDMA), para que a Interferência de Múltiplo Acesso (IMA) e a Interferência Intersimbólica (ISI) diminuíssem [56]. Essa é uma técnica de múltiplo acesso na qual múltiplos usuários compartilham o mesmo canal de frequência ao empregar diferentes sequências de códigos para modular os sinais transmitidos. Dessa forma, técnicas iterativas de detecção começaram a ser desenvolvidas. A partir disso, foi possível demonstrar que duas sequências de código intercaladas independentemente podiam ser separadas usando a detecção iterativa. Após essas descobertas, o IDMA surgiu como um caso mais desenvolvido do CDMA, porém com fundamentos diferentes do DS-CDMA [57].

As informações no IDMA são divididas em *interleavers* e transmitidas em frequências distintas. Esses *interleavers* têm a função de reorganizar os dados de entrada para que os bits adjacentes não sejam transmitidos juntos. A separação do usuário no IDMA é realizada de forma eficiente para melhorar a capacidade de comunicação em sistemas de transmissão. Para isso são utilizados códigos de identificação únicos e técnica de interpolação no domínio do tempo [57].

O IDMA foi criado com o objetivo de melhorar a eficiência espectral e mitigar interferências que podem ocorrer entre diferentes usuários devido a atrasos de propagação no canal de comunicação, os quais são prejudiciais na detecção das mensagens dos usuários [57]. Esta técnica se concentra na divisão eficiente da informação utilizando códigos de espalhamento exclusivos para cada usuário [57].

No IDMA, o fluxo de dados deve ser primeiramente codificado utilizando um codificador com taxa consideravelmente baixa. Após esse processo, os bits codificados são intercalados afim de minimizar os ciclos curtos de forma estatística. Esses bits podem ser denominados como *chips*. Durante a iteração entre os usuários, cada um recebe um *interleaver* específico (*chip a chip*). De forma linear e antecipadamente à transmissão, os fluxos de dados que são codificados e intercalados de um mesmo usuário em camadas diferentes ficam sobrepostos. Essa sobreposição, de forma prioritária, é feita com fases e amplitudes diferentes. Ou seja, cada usuário modula seu sinal com o seu código de espalhamento exclusivo [58].

Se até dois *chips* chegarem a se corromper, com o uso do *Iterative Multi-user Detection* (IMD) a sequência de propagação consegue ser recuperada. Isso se dá ao alto ganho da diversidade que esse sistema propõe [38].

Considerando que o sinal original do usuário A no domínio do tempo é representado por $S(t)$ e o código de espalhamento exclusivo do usuário A é representado por $C_A(t)$, então o sinal modulado para o usuário A é dado por

$$S(t)C_A(t) \quad (11)$$

O sinal recebido total pode ser representado por

$$R(t) = \sum S_i(t)C_i(t) + N_t, \quad (12)$$

onde $S_i(t)$ é o sinal transmitido pelo usuário i , $C_i(t)$ é o código de espalhamento exclusivo do usuário i e $N(t)$ o ruído AWGN.

O receptor então utiliza o mesmo código de espalhamento $C_A(t)$ para recuperar o sinal original $S_A(t)$ do usuário A usando o processo de correlação. A correlação máxima indica a presença do sinal desejado [57], [58]. A correlação entre o sinal recebido e o código de espalhamento é dado por

$$\text{Corr}(S(t)C_A(t), C_A(t)) = \int S(t)C_A(t)dt \quad (13)$$

Na Figura 10 [58] é possível observar a representação da transmissão e recepção do IDMA. No conjuntos de blocos Transmissor para o usuário K , cada fluxo de dados é codificado e em seguida intercalados pelo bloco Interleaver. Depois os fluxos de dados são sobrepostos antes da realização da transmissão. Ao passarem pelo canal, o fluxo de dados adquire o AWGN. Já no caminho da recepção os dados passam pelo Estimador de Sinais Elementares (ESE) e depois é realizado o processo inverso da transmissão, onde os dados passam pelo bloco Deinterleaver e no final são decodificados. O receptor recebe um sinal aproximado daquele enviado pelo transmissor [58].

As principais vantagens da técnica IDMA são:

- Capacidade para explorar totalmente as vantagens dos sistemas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) massivos, com auxílio da Estimativa de Canal Agregado por Dados (DACE) [57].
- Faz uso da técnica de intercalação com objetivo de separar os usuários. Em comparação com as técnicas de

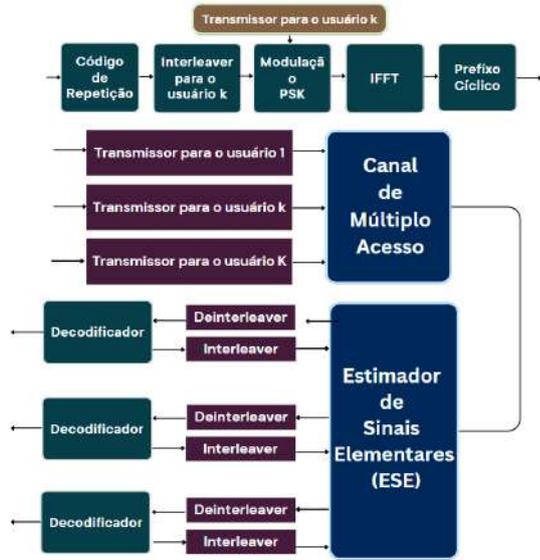


Fig. 10. Quadro do processo de transmissão e recepção entre usuários no IDMA [58].

OMA, sua diversidade, eficiência espectral e desempenho são melhores [59].

- Sua implementação para a diminuição do desvanecimento e interferência do usuário possui resultados positivos [59].
- Flexível em relação a detecção iterativa com custo baixo em diferentes estados de canais [58].
- A aplicação de uma estratégia multi-código permite a adaptação de taxa/potência, proporcionando suporte a diferentes taxas de dados. A modulação no IDMA permanece constante, sendo até binária, e o código de canal é uniforme em todas as camadas. A capacidade de adaptação ou economia de energia se destaca, especialmente no *uplink*. [58].
- Como a ortogonalidade não interfere nessa técnica de múltiplo acesso e a cada camada um *interleaver* é inserido, pode-se empregar a quantidade de antenas desejada no sistema [58].

Em contrapartida, uma limitação associada ao IDMA é verificada na complexidade do receptor que aumenta proporcionalmente com o número de caminhos, representando uma consideração crítica em sistemas banda larga [58].

D. Multiple-User Shared Access

O MUSA é uma estratégia que melhora o múltiplo acesso para usuários do NOMA em sistemas sem fio, otimizando a alocação de recursos de acordo com as necessidades dos usuários. Essa técnica de múltiplo acesso possibilita o compartilhamento eficiente do espectro de frequência entre diferentes usuários de comunicação, sendo concedido gratuitamente. Esse modo é livre de concessão, ou seja, os dispositivos podem iniciar a transmissão de dados sem a necessidade de uma autorização específica para acessar o canal de comunicação, facilitando uma comunicação mais dinâmica e eficiente. A ideia por trás do MUSA é permitir que várias redes e serviços compartilhem o mesmo espectro de frequência de forma

adaptativa baseada em multiplexação de domínio de código [5]. Portanto, essa técnica envolve a elaboração de algoritmos e técnicas de gerenciamento de meios que podem alocar eficientemente recursos de espectro e potência aos usuários NOMA, garantindo que a eficiência espectral seja maximizada e que os requisitos de latência e qualidade de serviço sejam atendidos [60].

O MUSA considera a alocação flexível de faixas de frequência com base em critérios como tempo, localização e qualidade de serviço. Portanto, as frequências podem ser alocadas dinamicamente a diferentes usuários de acordo com as suas necessidades, permitindo uma melhor utilização do espectro e um suporte eficaz a dispositivos IoT [60].

Na transmissão, os dados dos usuários são modulados para símbolos *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Na Figura 11 [60] é possível identificar esse processo, onde m_k são os símbolos modulados de c_k , c_k são os bits codificados de d_k . Os símbolos de propagação t_k são obtidos após a realização do espalhamento com um código de propagação complexo s_k .

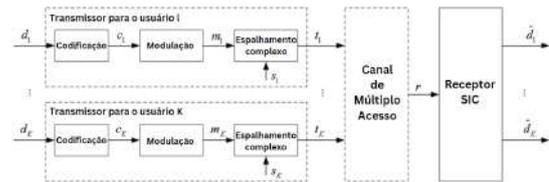


Fig. 11. Processo de transmissão e recepção do MUSA [60].

O sinal sobreposto recebido é dado por:

$$r = \sum_{k=1}^K h_k t_k + n \quad (14)$$

onde h_k é o coeficiente de canal para o usuário k e n é o ruído AWGN. No receptor, é realizada a decodificação, ou seja, os diferentes sinais sobrepostos são separados para recuperar com precisão os bits de dados originais de cada usuário. O SIC é usado para realizar esse processo [60].

No cenário de *uplink* do sistema MUSA, para distinguir os sinais sobrepostos dos diferentes dispositivos de usuário, o mesmo utiliza sequências complexas curtas. Cada usuário recebe um livro código e mapeia o seu símbolo QAM em um sequência de comprimento curto. No entanto, pode ocorrer de um usuário usar a mesma palavra código que outro usuário da rede, causando colisões. Cada usuário multiplica seu símbolo de informação pela palavra código de propagação correspondente. Isso faz com que o sinal transmitido seja espalhado em frequência e de tempo. Os usuários transmitem esses sinais espalhados para a BS. Dado que o MUSA é um protocolo de acesso sem subsídios, um dispositivo específico pode realizar transmissões sem a necessidade de agendamento prévio pela BS. Cada dispositivo seleciona de maneira aleatória uma sequência de código normalizada s_k [61], conforme definido por

$$s_k = \left(\frac{g_q}{\sqrt{g_q^H g_q}} \right), \quad (15)$$

para espalhar seu símbolo de dados antes de transmitir, em que g_q é a q -ésima coluna do livro de códigos G . Na BS, os sinais recebidos dos dispositivos de usuário chegam como um conjunto sobreposto de símbolos espalhados. A BS possui conhecimento das sequências de propagação e, portanto, pode realizar a correlação entre o sinal recebido e as sequências conhecidas. Todos os símbolos transmitidos por um usuário determinado são submetidos a uma multiplicação pela mesma sequência de propagação. Visando otimizar a eficácia do sistema e minimizar a interferência média, é possível utilizar diferentes sequências de propagação para símbolos individuais pertencentes ao usuário.

Inicialmente, é aplicado um processamento linear para mitigar a interferência entre os dispositivos de usuário. Isso ajuda a separar os sinais sobrepostos, mas pode não ser suficiente para uma separação completa. Após o processamento linear, o MUSA utiliza a técnica SIC. Depois que a interferência é mitigada com sucesso, os símbolos individuais dos dispositivos de usuário podem ser decodificados com precisão [5]. Durante todo esse processo, a BS pode ajustar a alocação de recursos, como potência e largura de banda, para otimizar o desempenho do sistema com base nas condições do canal e nos requisitos de qualidade de serviço dos dispositivos de usuário. Essas estratégias implementadas no receptor garantem uma alocação eficaz dos recursos e uma separação adequada dos sinais, contribuindo para o desempenho geral do sistema MUSA no *uplink* [5]. Na Figura 12 [5] tem-se a representação do *uplink* no MUSA.

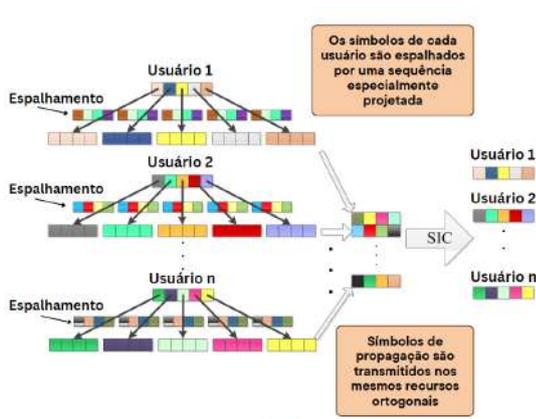


Fig. 12. Representação do *uplink* de n usuários no MUSA [5].

O processo de *downlink* do MUSA é a parte do sistema em que a BS (ou ponto de acesso) transmite dados para os dispositivos de usuário. No *downlink*, a estação base coordena a transmissão de informações para vários dispositivos de usuário, otimizando a alocação de recursos para maximizar a eficiência espectral e atender às necessidades dos dispositivos [5]. Dentro da estrutura MUSA, os dispositivos compartilham os recursos de frequência e de tempo OFDM, sendo que o

sinal recebido na n -ésima subportadora do i -ésimo símbolo OFDM é expresso por

$$r^{n,i} = \sum_{k=1}^K h_k^{n,i} x_k^{n,i} + w^{n,i} \quad (16)$$

onde $n = (1, \dots, N)$, $i = (1, \dots, LJ/N)$, em que $x_k^{n,i}$ é o elemento da n -ésima linha e da i -ésima coluna da matriz X_k , $h_k^{n,i}$ é a resposta do canal entre o k -ésimo usuário e a BS e $w^{n,i}$ é o ruído AWGN [62].

Os dispositivos de usuário são agrupados em conjuntos chamados de grupo G . Cada grupo G consiste em vários dispositivos de usuário que compartilham recursos de transmissão. Dentro de cada grupo G , a BS ajusta individualmente a potência de transmissão e aplica ponderações aos símbolos de dados destinados a cada dispositivo de usuário. Isso permite controlar a potência transmitida para cada usuário e garantir uma alocação de recursos adequada. Para espalhar os símbolos sobrepostos de grupos G , sequências ortogonais de comprimento G podem ser usadas como sequências de espalhamento. Para evitar interferência entre os dispositivos de usuário dentro do mesmo grupo G , os sinais possuem propriedade de serem ortogonais entre si [5].

Dentro de cada grupo G , o MUSA utiliza a técnica SIC para realizar o cancelamento de interferência intragrupo. Após a eliminação da interferência, os dispositivos de usuário decodificam os símbolos de dados destinados a eles, recuperando as informações transmitidas pela BS [5]. Durante todo o processo de *downlink*, a BS pode ajustar dinamicamente a alocação de recursos, como a potência de transmissão e a largura de banda, para otimizar o desempenho do sistema com base nas condições do canal e nas necessidades individuais dos dispositivos de usuário [5].

A representação do *downlink* no MUSA pode ser verificada na Figura 13 [61].

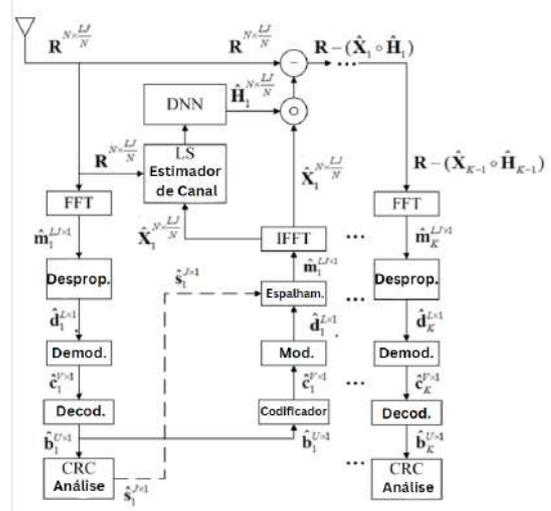


Fig. 13. Representação do *downlink* entre usuários e BS no MUSA [61].

O MUSA apresenta algumas vantagens, como:

- Capacidade de melhorar a eficiência espectral comparado ao OMA. Isso significa que esta técnica permite transmitir

mais dados em um determinado espectro de frequência, o que é crucial em um ambiente cujo espectro de rádio está se tornando um recurso cada vez mais escasso [63].

- Suporta múltiplos usuários que compartilham o mesmo canal de comunicação de forma eficiente. Isso é particularmente relevante em sistemas de comunicação de alta densidade, como nas redes 5G e IoT [63].
- Distribuição mais equitativa de recursos entre os usuários, garantindo que todos tenham a oportunidade de transmitir seus dados, independentemente das condições do canal [63].
- Pode ser adaptado para cenários em que o número de usuários é maior que o número de recursos de transmissão disponíveis, o que pode impor interferência entre os usuários. Isso o torna flexível em situações realistas [5].

Em contrapartida, verifica-se algumas desvantagens relacionadas a aplicação do MUSA, como:

- A alocação de recursos e o gerenciamento de interferência no MUSA podem exigir protocolos de controle e sinalização complexos, o que pode resultar em um aumento do *overhead*. Isso resulta em sobrecarga no desempenho do sistema [60].
- Os desvios na sincronização podem resultar em degradação do desempenho do sistema, causando perda de capacidade e degradação da qualidade do serviço. Isso pode afetar a confiabilidade e a consistência da transmissão de dados, trazendo riscos de segurança [64].
- A implementação desta técnica pode ser complexa devido à necessidade de processamento adicional no transmissor e no receptor para separar os usuários e mitigar a interferência. Os custos de *hardware* podem aumentar junto com a complexidade de implementação [64].

IV. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A AI refere-se à capacidade de máquinas e sistemas computacionais realizarem tarefas que normalmente exigiriam inteligência humana. Esses sistemas são projetados para simular processos cognitivos humanos, como aprendizado, raciocínio, resolução de problemas, compreensão de linguagem natural e interação social. A AI busca criar máquinas capazes de perceber o ambiente, tomar decisões com base em informações e aprender com a experiência [65].

Com aplicações abrangentes em setores como saúde, finanças, manufatura, varejo, transporte, comunicação e outros, a AI tem impulsionado significativamente a eficiência e a organização produtiva. Por meio de suas contribuições, a AI facilitou a automação de diversas tarefas dentro das empresas e instituições. Sua aplicação percorre a utilização de dispositivos inteligentes em residências e ambientes de trabalho, simplificando as tarefas diárias. Além disso, a crescente popularidade de carros autônomos e a dependência contínua de redes sociais, mecanismos de busca e plataformas de compras online destacam a versatilidade e a praticidade oferecidas pelos modelos de AI modernos [65]. Seu potencial de transformação continua a ser explorado em diversas áreas, impulsionando uma sociedade cada vez mais conectada e tecnologicamente avançada [65], [66]. Embora a AI continue

a evoluir rapidamente, muitos desafios permanecem, como a interpretabilidade dos modelos, a ética no uso dos dados e a questão da responsabilidade e transparência na tomada automatizada de decisões [66].

A. Machine Learning

Machine Learning (ML) pertence a uma área da AI em que a aprendizagem e o aprimoramento de desempenho ocorrem automaticamente, sem a necessidade de programação explícita. Essa aprendizagem é estimulada pela análise de dados e pela identificação de padrões, permitindo que os modelos desenvolvam a capacidade de realizar tarefas específicas de forma mais eficiente [67]. O ML pode ser dividido de acordo com o tipo de aprendizado, sendo eles: supervisionado, não-supervisionado, semi-supervisionado e por reforço.

No aprendizado supervisionado, os algoritmos são treinados usando um conjunto de dados que possui exemplos rotulados, ou seja, a máquina tem o conhecimento das respostas esperadas. O objetivo é aprender a mapear as relações entre as entradas e as saídas para fazer classificações ou previsões precisas em novos dados [68]. Essa classe de aprendizagem pode ser subdividida em problemas de classificação e regressão. Os problemas de classificação são responsáveis por categorizar as entradas, ou seja, atribuir cada entrada a uma classe ou categoria específica. Já os de regressão preveem o valor de uma variável com base em dados históricos [69]. Exemplos de algoritmos de aprendizado supervisionado englobam regressão linear, regressão logística, árvores de decisão, florestas aleatórias, máquinas de vetores de suporte, k vizinhos mais próximos e redes neurais [68].

O aprendizado não-supervisionado, o algoritmo necessita aprender padrões com os dados de entrada, sem que algum rótulo de saída seja dado. Nesse aprendizado é utilizado a técnica de *clustering* que foca em reunir dados em conjuntos específicos e diferentes entre si. Diversos algoritmos podem ser usados, tais como: K-médias, redes neurais artificiais e análise de componentes principais [70].

A combinação do aprendizado supervisionado com o não-supervisionado dá origem ao aprendizado semi-supervisionado. Nele, o modelo pode ser treinado usando tanto um conjunto de dados que contém exemplos rotulados quanto exemplos não rotulados. Normalmente, há mais dados rotulados do que não rotulados. Uma forma de alcançar o aprendizado semi-supervisionado, é combinar os algoritmos de classificação e de *clustering* [68], [70].

Diferentemente dos aprendizados anteriores, o aprendizado por reforço não possui exemplos de treinamento, sejam eles rotulados ou não. Nesse cenário, o algoritmo de aprendizagem por reforço, chamado de agente, é inserido para aprender a se comportar em um ambiente específico por meio de interações caracterizadas por tentativa e erro. Ao observar o estado corrente do ambiente, toma decisões estratégicas, executando ações que culminam em recompensas ou reforços. O agente, de maneira autônoma, busca discernir a melhor estratégia, denominada política, com o intuito de otimizar suas recompensas ao longo do tempo. A política atua como uma função que associa os diferentes estados do ambiente às ações

que o agente deve tomar em cada situação específica. Os principais algoritmos desse tipo de aprendizagem são o *Q-Learning* e *Deep Q-Learning* [71].

Na Figura 14 são representados os modelos de aprendizado mais utilizados em ML [72].

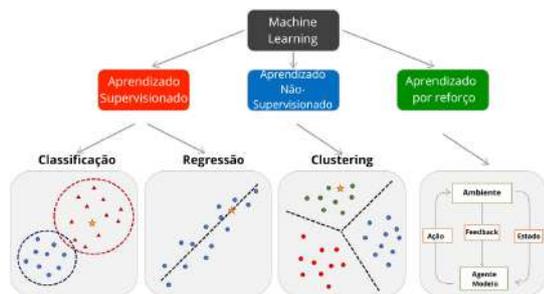


Fig. 14. Ilustração dos modelos de aprendizado supervisionado, não-supervisionado e por reforço. Os pontos e os triângulos representam os dados usados no treinamento, e a estrela representa o dado estimado com base no modelo treinado [72].

Atualmente, nota-se uma vastidão de dados nunca antes visto. Esta abundância de informações se mostra desafiadora para a análise manual por parte dos seres humanos. Contudo, para modelos de ML isso não é um problema, pois quanto maior for a quantidade de dados disponíveis melhor será o aprendizado do modelo [67].

B. Deep Learning

As *Deep Neural Networks* (DNNs) são uma classe de algoritmos de ML inspirados na estrutura e funcionamento do cérebro humano e utiliza o aprendizado de representação, como pode ser observado na Figura 15. Esses algoritmos são uma extensão das Redes Neurais Artificiais (RNAs), com uma arquitetura mais profunda, composta por várias camadas ocultas entre a camada de entrada e a camada de saída [73]. Essas redes são capazes de aprender representações complexas



Fig. 15. Origem do aprendizado profundo a partir da AI [73].

dos dados por meio de múltiplas camadas de processamento não linear. A estrutura em camadas das DNNs permite que elas aprendam características dos dados de maneira hierárquica, começando com características mais simples nas camadas iniciais e progredindo para características mais abstratas e complexas nas camadas mais profundas. Cada camada da rede consiste em um conjunto de neurônios interconectados que

realizam operações matemáticas nos dados de entrada, para que possam estudar o resultado na saída relacionado a esse dado de entrada. A representação desse processo se dá na Figura 16 [74].

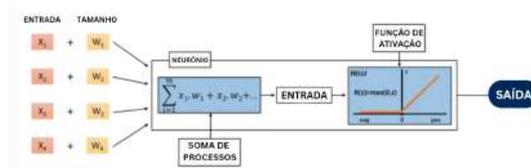


Fig. 16. Relação entre a entrada e a saída do envolvimento matemático de um neurônio individual [74].

Cada unidade neural integra valores de entrada ponderados, ou seja, cada neurônio em uma rede neural recebe múltiplos sinais de entrada, e cada um desses sinais é multiplicado por um peso específico. A ponderação indica a importância relativa de cada sinal de entrada para a operação do neurônio. Após a multiplicação dos valores de entrada pelos pesos correspondentes, esses produtos ponderados são somados. A soma ponderada dos valores de entrada é então submetida a uma função de ativação ou a algum outro tipo de operação, dependendo da arquitetura da rede neural. A função de ativação determinará a saída final ou o estado de ativação do neurônio. A resposta da unidade neural é determinada pelo tipo de função de ativação escolhida para o processo. Na Figura 16 [74], uma soma de valores superior a zero resultará em uma saída proporcional ao valor de entrada, enquanto uma soma de entrada igual ou inferior a zero resultará em uma saída nula para a unidade neural. O processo de aprendizado é alcançado por meio de ajustes iterativos nos pesos durante a fase de retroalimentação, permitindo a identificação da combinação de valores ótimos que mapeia com maior precisão as entradas para a saída desejada [74].

Nas *Deep Neural Networks* (DNNs) é possível distinguir alguns tipos de camadas. A primeira é a camada de entrada que recebe os dados de entrada originais. Cada nó na camada de entrada corresponde a uma variável de entrada, como *pixels* de uma imagem ou atributos de um conjunto de dados. O segundo tipo de camada é composto pelas camadas ocultas. Essas camadas são responsáveis por aprender representações complexas dos dados de entrada. Cada camada oculta consiste em vários neurônios que aplicam transformações não lineares aos dados de entrada, ajudando a extrair características e padrões. A última camada de rede é a camada de saída, ou seja, é a camada que produz os resultados finais da rede, que podem ser previsões, classificações ou valores contínuos, dependendo da tarefa específica. Cada nó na camada de saída corresponde a uma classe ou categoria de saída [75].

O avanço das DNNs tem sido notável em diversas áreas, impulsionando inovações em AI e ML. Desde a implementação inicial, ocorreram avanços significativos no treinamento mais eficiente de redes mais profundas, melhor compreensão teórica das propriedades de generalização das DNNs e desenvolvimento de novas arquiteturas mais eficazes [76], [77].

V. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA ÀS TÉCNICAS DE MÚLTIPLO ACESSO

O ML adota uma abordagem orientada por dados para assimilar conhecimento e resolver questões complexas sem depender de modelos ou equações predefinidas. *Deep Learning* (DL) obteve um notável crescimento recentemente e está sendo implementado em várias áreas de pesquisa. Isso inclui diversos setores nas comunicações, impulsionado pelas atuais bibliotecas de *software* de DL. Várias pesquisas recentes têm empregado técnicas de ML e DL para abordar diversos desafios em NOMA [11]–[13], [78]–[86].

Em [12], a ênfase é sobre a busca do *Channel State Information* (CSI) ideal para alcançar o SIC ideal em ambas as direções de comunicação (*uplink* e *downlink*), utilizando DNN. O foco abrange a melhoria do desempenho e também a aplicação do DNN no projeto de constelações de sinal, na confiabilidade de acesso sem concessão, e na eficiência energética do agendamento e alocação de potência. Já em [13], a atenção volta-se para o desafio específico da alocação de recursos no *downlink* de PD-NOMA, com foco em dispositivos IoT baseados em satélites. Aqui, a solução proposta envolve uma abordagem de alocação de energia baseada em DL, com a DNN antecipando a relação ponderada entre o estado da fila e o estado do canal, proporcionando uma solução para a decodificação e distribuição de recursos em um ambiente de energia restrita. Por outro lado, [14] concentra-se na dificuldade de detecção multiusuária em dispositivos IoT em um sistema PD-NOMA durante o *downlink*. A implementação de DNN para derivar uma constelação multiusuária, substituindo o modulador convencional por um modulador auxiliado por DL, destaca-se como uma inovação fundamental para melhorar o desempenho em comparação com métodos convencionais de detecção SIC.

Em [78], a integração de DL no contexto de PD-NOMA antecipa a distribuição de potência, mesmo considerando SIC imperfeito. Aqui, a DNN é treinada para aprender a alocação de potência com base em respostas de canal normalizadas pelo ruído, proporcionando uma solução para lidar com condições dinâmicas do sistema. O estudo apresentado em [79] oferece uma perspectiva única ao otimizar a constelação de vários usuários no receptor por meio de *autoencoders*. Em vez de implementar SIC convencional, a abordagem proposta utiliza *autoencoders* para estimar o desempenho dos usuários em termos de BER, resultando em ganhos significativos de SNR. Por sua vez, [80] introduz uma metodologia de detecção de usuários assistida por DNN, aplicando treinamento *offline* orientado por dados para derivar um receptor aproximadamente ótimo. A redução de complexidade computacional e aprimoramento na detecção de usuários são destacados como benefícios significativos dessa abordagem. Finalmente, [81] apresenta uma estrutura de constelação para sistemas PD-NOMA durante o *downlink*, baseada em DL. A parametrização do mapeamento de bits para símbolos e a detecção de multiusuário utilizando DNN, proporcionando uma taxa de erro de símbolo inferior em comparação com abordagens convencionais de sistemas NOMA.

Os autores de [82] e [83] tiveram como foco minimi-

zar a potência total de transmissão nos sistemas PDMA, visando aprimorar a eficiência energética. Além disso, eles se empenharam em garantir a satisfação dos requisitos de *Quality of Service* (QoS) para cada usuário. No âmbito dessas investigações, foi utilizada uma abordagem baseada em DL. Os resultados obtidos por meio da aplicação da técnica DL revelam-se promissores, evidenciando sua eficácia nos objetivos propostos.

No trabalho [84] foi proposto um esquema de detecção baseado em DNN para sistemas MUSA sem concessão. O esquema abordado é treinado a partir do conjunto de dados do sinal recebido, identificando os dispositivos ativos sem necessidade de conhecimento prévio sobre o nível de dispersão do dispositivo. Uma análise da curva de calibração é conduzida para verificar a precisão do modelo. Os resultados revelam que, em situações cujo número de dispositivos ativos é elevado no sistema, o modelo proposto demonstra uma probabilidade de detecção significativamente superior em comparação com as abordagens existentes, especialmente dentro da faixa de interesse da relação sinal-ruído.

Em [85], apresentou-se um modelo de detecção baseado em DNN para sistemas MUSA sem concessão. Durante a etapa de treinamento *offline*, o modelo determina a estrutura da matriz de detecção, o ruído distribuído aleatoriamente e a interferência entre dispositivos. O modelo treinado é capaz de discernir os dispositivos ativos do sinal recebido sem exigir conhecimento prévio sobre o nível de dispersão do dispositivo ou informações de estado do canal. Foram gerados gráficos de probabilidade de detecção e de valor preditivo positivo para análise. Os resultados evidenciam que o modelo baseado em DNN apresenta desempenho superior quando comparado aos métodos convencionais.

No artigo [86], foi apresentado um esquema para o sistema NOMA, durante o *downlink*, baseado em DL. A proposta incluiu um pré-codificador e decodificador SIC para minimizar o *Mean Square Error* (MSE), utilizando DNN. Essa abordagem visa pré-codificar adequadamente os sinais transmitidos para vários usuários no transmissor, utilizando a técnica de codificação de superposição e, assim, possibilitando a decodificação precisa desses sinais pelos usuários por meio do SIC. As simulações comprovam que o esquema proposto é superior aos esquemas convencionais.

Por fim, foi realizada uma vasta pesquisa bibliográfica de AI aplicada a técnica IDMA, porém não foram constatados artigos científicos empregando essa abordagem conjunta.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre as técnicas OMA e NOMA, permitindo entender suas funcionalidades e capacidades. A partir dos estudos das técnicas OMA e NOMA foi possível perceber que o NOMA possui um desempenho superior em uma variedade de testes e cenários, destacando seu potencial para melhorar a eficiência espectral e a capacidade de usuários concorrentes se comunicarem de forma mais eficaz. No entanto, também foi identificado uma complexidade significativamente maior em relação à decodificação das técnicas não ortogonais.

Para lidar com esse desafio de complexidade e viabilizar o uso das técnicas NOMA, foi investigada a aplicação de técnicas de AI como um meio para aprimorar a decodificação e mitigar as dificuldades existentes. A AI demonstrou um potencial notável para reduzir a complexidade e melhorar o desempenho das técnicas NOMA, oferecendo perspectivas promissoras para a implementação e otimização das tecnologias de comunicação sem fio, inclusive no contexto do desenvolvimento das redes de 6G.

Este estudo ofereceu uma visão para o campo de comunicações sem fio, realçando as vantagens das técnicas NOMA e a necessidade de enfrentar os desafios relacionados à complexidade. A junção entre as técnicas de múltiplo acesso e a AI representa uma alternativa promissora às futuras redes móveis.

VII. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FINATEL.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Chen and Y.-C. Liang, "Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of sys coverage, capacity, user data-rate and movement speed," *IEEE Access*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, 2020.
- [2] A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, and M. Liyanage, "Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 836–886, 2021.
- [3] M. Akbar, Z. Hussain, Q. Sheng, and S. Mukhopadhyay, "6G survey on challenges, requirements, applications, key enabling technologies, use cases, ai integration issues and security aspects," *arXiv preprint arXiv:2206.00868*, 2022.
- [4] M. Alsabah, M. A. Naser, B. M. Mahmmod, S. H. Abdhussain, M. R. Eissa, A. Al-Baidhani, N. K. Noordin, S. M. Sait, K. A. Al-Utaibi, and F. Hashim, "6G wireless communications networks: A comprehensive survey," *Ieee Access*, vol. 9, pp. 148 191–148 243, 2021.
- [5] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "A survey of non-orthogonal multiple access for 5G," *IEEE Access*, vol. 20, pp. 2294–2323, 2018.
- [6] X. Dai, S. Chen, S. Sun, S. Kang, Y. Wang, Z. Shen, and J. Xu, "Successive interference cancellation amenable multiple access (SAMA) for future wireless communications," in *2014 IEEE international conference on communication systems*. IEEE, 2014, pp. 222–226.
- [7] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis, and S. Papavassiliou, "Uplink resource allocation in SC-FDMA wireless networks: A survey and taxonomy," *Computer Networks*, vol. 96, pp. 1–28, 2016.
- [8] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "Ofdm and its wireless applications: A survey," *IEEE transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673–1694, 2008.
- [9] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, I. Chih-Lin, and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 6G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, 2015.
- [10] S. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K.-S. Kwak, "Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2016.
- [11] M. Vaezi, R. Schober, Z. Ding, and H. V. Poor, "Non-orthogonal multiple access: Common myths and critical questions," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 5, pp. 174–180, 2019.
- [12] M. K. Hasan, M. Shahjalal, M. M. Islam, M. M. Alam, M. F. Ahmed, and Y. M. Jang, "The role of deep learning in noma for 5G and beyond communications," in *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIC)*, 2020, pp. 303–307.
- [13] Y. Sun, Y. Wang, J. Jiao, S. Wu, and Q. Zhang, "Deep learning-based long-term power allocation scheme for noma downlink system in S-IoT," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 86 288–86 296, 2019.
- [14] L. Jiang, X. Li, N. Ye, and A. Wang, "Deep learning-aided constellation design for downlink noma," in *2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2019, pp. 1879–1883.
- [15] C. Ciochina and H. Sari, "A review of OFDMA and single-carrier FDMA," in *2010 European Wireless Conference (EW)*. IEEE, 2010, pp. 706–710.
- [16] L. M. Hoo, J. Tellado, and J. M. Cioffi, "FDMA-based multiuser transmit optimization for broadcast channels," in *2000 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Conference Record (Cat. No. 00TH8540)*, vol. 2. IEEE, 2000, pp. 597–602.
- [17] J. Marshall, "A system optimization approach to FDMA loadings," in *MILCOM 91-Conference record*. IEEE, 1991, pp. 441–445.
- [18] S. Lam, "Delay analysis of a time division multiple access (TDMA) channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 25, no. 12, pp. 1489–1494, 1977.
- [19] N. Nakajima, M. Kuramoto, K. Kinoshita, and T. Utano, "A system design for TDMA mobile radios," in *40th IEEE Conference on Vehicular Technology*. IEEE, 1990, pp. 295–298.
- [20] P. A. Ranta, Z.-C. Honkasalo, and J. Tapaninen, "TDMA cellular network application of an interference cancellation technique," in *1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference. Countdown to the Wireless Twenty-First Century*, vol. 1. IEEE, 1995, pp. 296–300.
- [21] L. L. Hanzo, L.-L. Yang, E.-L. Kuan, and H. K. Yen, "CDMA overview," *IEEE Access*, pp. 35–80, 2004.
- [22] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," *IEEE communications Magazine*, vol. 35, no. 12, pp. 126–133, 1997.
- [23] L. L. Hanzo, L.-L. Yang, E.-L. Kuan, and Yen, "Thirdgeneration CDMA systems," *IEEE communications Magazine*, pp. 857–928, 2004.
- [24] M. Hua, B. Ren, M. Wang, J. Zou, C. Yang, and T. Liu, "Performance analysis of OFDMA and SC-FDMA multiple access techniques for next generation wireless communications," in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2013, pp. 1–4.
- [25] S. C. Yang, *OFDMA system analysis and design*. Artech House, 2010.
- [26] G. Li and H. Liu, "On the optimality of the OFDMA network," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 438–440, 2005.
- [27] M. Yacoub, *Celular Communication Systems*. Prentice Hall, 1992.
- [28] T. Kebede, Y. Wondie, J. Steinbrunn, H. B. Kassa, and K. T. Kornegay, "Multi-carrier waveforms and multiple access strategies in wireless networks: Performance, applications, and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21 120–21 140, 2022.
- [29] D. Ilicev, "Analyses of space division multiple access (SDMA) schemes for global mobile satellite communications (GMSC)," *the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 14, no. 4, pp. 821–830, 2020.
- [30] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems*. Artech House, 2004.
- [31] C. Heine, *GSM Networks: Protocols, Terminology & Implementation*, 1999.
- [32] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for umts: hspa evolution and lte*. John Wiley & sons, 2007.
- [33] M. O. P. Michele Morelli and C.-C. Jay Kuo, "Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): a tutorial review," *IEEE Access*, vol. 95, pp. 1394 – 1427, 2007.
- [34] P. Noufal and C. H. Kumar, "A hybrid multi-user interference cancellation scheme for carrier frequency offset compensation in uplink OFDMA," in *2015 Fifth International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC)*. IEEE, 2015, pp. 191–195.
- [35] H. C. Nguyen, E. De Carvalho, and R. Prasad, "Multi-user interference cancellation scheme (s) for multiple carrier frequency offset compensation in uplink OFDMA," in *2006 IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2006, pp. 1–5.
- [36] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
- [37] N. Docomo, "Inc. white paper—5G evolution and 6G; ntt docomo," *Inc.: Tokyo, Japan*, 2020.
- [38] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2017.
- [39] A. Akbar, S. Jangsher, and F. A. Bhatti, "Noma and 5G emerging technologies: A survey on issues and solution techniques," *Computer Networks*, vol. 190, p. 107950, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621000888>
- [40] Y. Wang, B. Ren, S. Sun, S. Kang, and X. Yue, "Analysis of non-orthogonal multiple access for 5G," *China Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 52–66, 2016.
- [41] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroğlu, and S. M. Sait, "A survey of rate-optimal power domain noma with enabling technologies of future wireless networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2192–2235, 2020.

- [42] A. Mahmood, M. Marey, M. M. Nasralla, M. A. Esmail, and H. Mostafa, "Secure pd-noma with multi-user cooperation and user clustering in both uplink and downlink pd-noma," *Electronics*, vol. 11, no. 14, p. 2153, 2022.
- [43] N. Ye, H. Han, L. Zhao, and A.-h. Wang, "Uplink nonorthogonal multiple access technologies toward 5G: A survey," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018.
- [44] A. Al Khansa, Y. Yin, G. Gui, and H. Sari, "Power-domain noma or noma-2000?" in *2019 25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*. IEEE, 2019, pp. 336–341.
- [45] M. R. Zamani, M. Eslami, and M. Khorramzadeh, "Optimal sum-rate maximization in a noma system with channel estimation error," in *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*. IEEE, 2018, pp. 720–724.
- [46] M. Liaqat, K. A. Noordin, T. Abdul Latif, and K. Dimiyati, "Power-domain non orthogonal multiple access (PD-NOMA) in cooperative networks: an overview," *Wireless Networks*, vol. 26, pp. 181–203, 2020.
- [47] A. Akbar, S. Jangsher, and F. A. Bhatti, "Noma and 5G emerging technologies: A survey on issues and solution techniques," *Computer Networks*, vol. 190, p. 107950, 2021.
- [48] Y. Wang, B. Ren, S. Sun, S. Kang, and X. Yue, "Analysis of non-orthogonal multiple access for 5G," *China Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 52–66, 2016.
- [49] Y. Liu, Z. Qin, M. Elkaslan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2017.
- [50] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "A survey of non-orthogonal multiple access for 5G," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 2018.
- [51] J. Zeng, X. Fan, Y. Zhong, M. Peng, T. Lv, and T. Jiang, "Downlink power allocation optimization in pattern division multiple access," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 14 649–14 659, 2021.
- [52] J. Sun, C. Wang, J. Zeng, X. Su, and T. Lv, "Design of pdma pattern matrix in 5G scenarios," in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020, pp. 1–6.
- [53] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, I. Chih-lin, and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, 2015.
- [54] X. Dai, Z. Zhang, B. Bai, S. Chen, and S. Sun, "Pattern division multiple access: A new multiple access technology for 5G," *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 54–60, 2018.
- [55] S. Chen, B. Ren, Q. Gao, S. Kang, S. Sun, and K. Niu, "Pattern division multiple access—a novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 4, pp. 3185–3196, 2017.
- [56] X. Wang and H. Poor, "Iterative (turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 7, pp. 1046–1061, 1999.
- [57] L. Ping, L. Liu, K. Wu, and W. Leung, "Interleave division multiple-access," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 4, pp. 938–947, 2006.
- [58] K. Khurshid and I. A. Khokhar, "Comparison survey of 4G competitors (OFDMA, MC CDMA, UWV, IDMA)," in *2013 International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE)*, 2013, pp. 1–7.
- [59] A. Patil and G. Biradar, "Comparison of IDMA with other multiple access in wireless mobile communication," in *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2016, pp. 776–780.
- [60] Z. Yuan, G. Yu, W. Li, Y. Yuan, X. Wang, and J. Xu, "Multi-user shared access for internet of things," in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016, pp. 1–5.
- [61] G. Aquino, T. Barbosa, M. Chafii, L. Mendes, and A. Abdul, "Musa grant-free access framework and blind detection receiver," vol. 36, 2021.
- [62] M. B. de Mello and L. L. Mendes, "Deep neural network parameterization for channel estimation in MUSA systems," *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, 2021. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244341787>
- [63] H. Zhang and S. Wu, "Multi-user shared access research in cell-free massive mimo," in *Wireless and Satellite Systems*, Q. Guo, W. Meng, M. Jia, and X. Wang, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 824–832.
- [64] E. Çatak, F. Tekçe, O. Dizdar, and L. Durak-Ata, "Multi-user shared access in massive machine-type communication systems via superimposed waveforms," *Physical Communication*, vol. 37, p. 100896, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490718304956>
- [65] J. S. Sichman, "Inteligência artificial e sociedade: avanços e riscos," *Estudos Avançados*, vol. 35, no. 101, p. 37–50, Jan 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35101.004>
- [66] T. C. M. J., "The impact of artificial intelligence on human society and bioethics," in *The impact of artificial intelligence on human society and bioethics*. Department of Medical Sociology and Social Work, Taiwan., 2020.
- [67] S. Shalev-Shwartz and S. Ben-David, *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014.
- [68] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, 2015.
- [69] A. Shashua, *Introduction to Machine Learning*. School of Computer Science and Engineering The Hebrew University of Jerusalem, 2008.
- [70] A. Géron, *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. "O'Reilly Media, Inc.", 2022.
- [71] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*. Prentice Hall, 2008.
- [72] J. Peng, E. C. Jury, P. Dönnies, and C. Ciurtin, "Machine learning techniques for personalised medicine approaches in immune-mediated chronic inflammatory diseases: applications and challenges," *Frontiers in pharmacology*, vol. 12, p. 720694, 2021.
- [73] J. S. M. A. F. M. A.-A. L. F. Laith Alzubaidi Jinglan Zhang, Amjad J. Humaidi Ayad Al-Dujaili Ye Duan Omran Al-Shamma, "Review of deep learning: concepts, cnn architectures, challenges, applications, future directions," in *Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions*. Journal of Big Data, 2021, vol. 8.
- [74] M. T. Adrian Justin Georgevici, "Neural networks and deep learning: a brief introduction," *Intensive Care Medicine*, pp. 712–714, 2019.
- [75] K. J. Lee, "Chapter seven - architecture of neural processing unit for deep neural networks," in *Hardware Accelerator Systems for Artificial Intelligence and Machine Learning*, ser. Advances in Computers, S. Kim and G. C. Deka, Eds. Elsevier, 2021, vol. 122, pp. 217–245. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065245820300887>
- [76] X.-Y. Liu, Y. Fang, L. Yang, Z. Li, and A. Walid, "Chapter 9 - high-performance tensor decompositions for compressing and accelerating deep neural networks," in *Tensors for Data Processing*, Y. Liu, Ed. Academic Press, 2022, pp. 293–340. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244470000157>
- [77] A. Singh, K. Saini, V. Nagar, V. Aseri, M. S. Sankhla, P. P. Pandit, and R. L. Chopade, "Chapter sixteen - artificial intelligence in edge devices," in *Edge/Fog Computing Paradigm: The Concept Platforms and Applications*, ser. Advances in Computers, P. Raj, K. Saini, and C. Surianarayanan, Eds. Elsevier, 2022, vol. 127, pp. 437–484. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065245822000420>
- [78] W. Saetan and S. Thipchaksurat, "Power allocation for sum rate maximization in 5G noma system with imperfect sic: A deep learning approach," in *2019 4th International Conference on Information Technology (InCIT)*, 2019, pp. 195–198.
- [79] F. Alberge, "Constellation design with deep learning for downlink non-orthogonal multiple access," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018, pp. 1–5.
- [80] J. Pan, N. Ye, A. Wang, and X. Li, "A deep learning-aided detection method for ftn-based noma," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, pp. 1–11, 2020.
- [81] L. Jiang, X. Li, N. Ye, and A. Wang, "Deep learning-aided constellation design for downlink noma," in *2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, 2019, pp. 1879–1883.
- [82] J. Luo, J. Tang, D. K. C. So, G. Chen, K. Cumanan, and J. A. Chambers, "A deep learning-based approach to power minimization in multi-carrier noma with SWIPT," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 17 450–17 460, 2019.
- [83] A. Chaturvedi, A. Bhardwaj, D. Singh, B. Pant, J. L. A. González, and F. A., "Integration of dl on multi-carrier non-orthogonal multiple access system with simultaneous wireless information and power transfer," in *2022 11th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)*, 2022, pp. 640–643.
- [84] S. Thushan, S. Ali, N. H. Mahmood, N. Rajatheva, and M. Latva-Aho, "Deep learning-based blind multiple user detection for grant-free SCMA and musa systems," *IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking*, vol. 1, pp. 61–77, 2023.

- [85] T. Sivalingam, S. Ali, N. Huda Mahmood, N. Rajatheva, and M. Latva-Aho, "Deep neural network-based blind multiple user detection for grant-free multi-user shared access," in *2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2021, pp. 1–7.
- [86] J.-M. Kang, I.-M. Kim, and C.-J. Chun, "Deep learning-based mimo-noma with imperfect sic decoding," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3414–3417, 2020.

Dispositivo de Avaliação de Saúde Bucal com Solução de Baixo Custo

Thomas Ceccon Guimarães, Elisa Renno Carneiro Dester,
Luma Rissatti Borges do Prado, Rita Elizabeth Santos de Almeida
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

thomas.ceccon@gec.inatel.br, elisa.renno@inatel.br luma.prado@inatel.br r.elizabeth@inatel.br

Abstract—The project aimed to improve the prototype developed, creating a low-cost device to help promote oral health. The prototype used a red laser and a light sensor (LDR, Light Dependent Resistor), based on the phenomenon of fluorescence to detect cavities by analyzing the light reflected by the tooth surface. After the publication of the first article, the device was improved for greater portability, with the creation of a custom PCB and a pen modeled in PLA. In addition, a 3D printed dental arch was developed. To minimize interference from external light, a red filter was added, improving the accuracy of the LDR in detecting the light generated by the laser. These improvements aim to validate the device and, subsequently, ensure its implementation in health centers, facilitating the diagnosis of cavities in vulnerable communities and promoting accessible oral care.

Index Terms—cavities, dentistry, fluorescence, laser

Resumo—O projeto visou aprimorar o protótipo desenvolvido, criando um dispositivo de baixo custo para auxiliar na promoção da saúde bucal. O protótipo utilizou um laser vermelho e um sensor de luz (LDR, Light Dependent Resistor), baseado no fenômeno da fluorescência para detectar cáries ao analisar a luz refletida pela superfície dentária. Após a publicação do primeiro artigo, o dispositivo foi aprimorado para maior portabilidade, com a criação de uma PCB personalizada e uma caneta modelada em PLA. Além disso, foi desenvolvida uma arcada dentária impressa em 3D. Para minimizar a interferência de luz externa, foi adicionado um filtro vermelho, melhorando a precisão do LDR na detecção da luz gerada pelo laser. Essas melhorias visam validar o dispositivo e, posteriormente, garantir sua implementação em postos de saúde, facilitando o diagnóstico de cáries em comunidades vulneráveis e promovendo um cuidado bucal acessível.

Palavras chave—cáries, Saúde bucal, Odontologia, fluorescência, laser

I. INTRODUÇÃO

A saúde bucal é fundamental para o bem-estar geral, pois doenças bucais podem desencadear sérias complicações em diferentes fases da vida. A falta de avaliações odontológicas regulares pode resultar em problemas como infecções, dores crônicas e até a perda dos dentes, impactando negativamente a qualidade de vida das pessoas. Entre os problemas mais comuns, a cárie dentária se destaca como uma doença infecciosa que leva à desmineralização e destruição progressiva dos dentes, sendo uma das principais causas de dor e desconforto odontológico.^{[1], [2], [3]}

Atualmente, dispositivos de detecção precoce de cáries desempenham um papel crucial na prevenção e tratamento dessa condição. Tecnologias como o *DIAGNOdent*, que utiliza luz vermelha pulsada para induzir fluorescência nas bactérias presentes nos dentes, são amplamente utilizadas em consultórios odontológicos.^[4] No entanto, o alto custo desses dispositivos,

que pode variar entre 2 a 5 mil dólares, limita seu uso em populações de menor poder aquisitivo, dificultando o acesso ao diagnóstico precoce.^[2] Com o objetivo de democratizar o acesso a essa tecnologia, foi desenvolvido um dispositivo alternativo de baixo custo utilizando um laser vermelho com comprimento de onda entre 655 a 670 nm, em conjunto com um sensor de luz (LDR, Light Dependent Resistor).

Na fase inicial do projeto Odonto, desenvolvido no início de 2023 por Ana Beatriz dos Santos Mariano e Thomas Ceccon Guimarães, o circuito foi montado em uma protoboard, utilizando um laser e um resistor LDR (Light Dependent Resistor) para detectar a luz refletida.^[1]

O objetivo do projeto foi desenvolver um dispositivo portátil e eficiente para a detecção de cáries, facilitando seu uso. Nesta versão do projeto, foram implementadas melhorias para otimizar o desempenho do dispositivo. Primeiramente, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (PCB) personalizada, substituindo a protoboard e proporcionando maior estabilidade elétrica e precisão nas medições. Além disso, foi modelada e impressa em 3D uma caneta projetada no software *SolidWorks*, garantindo um design mais ergonômico e portátil para o dispositivo. Para aprimorar a fase de testes, foi desenvolvida uma arcada dentária impressa em 3D, permitindo uma validação mais precisa e controlada do sistema. Por fim, a adição de um filtro vermelho na extremidade da caneta minimizou a interferência da luz ambiente, aumentando a sensibilidade do LDR à luz do laser e aprimorando a precisão da detecção.

II. METODOLOGIA

O aprimoramento do projeto consistiu na substituição da montagem em protoboard por uma placa de circuito impresso (PCB), proporcionando maior estabilidade ao sistema. Destaca-se o desenvolvimento da PCB no software *EasyEDA*, onde os componentes foram integrados. A seguir, são listados os componentes incorporados à PCB desenvolvida:

- **Laser vermelho** (comprimento de onda de 655 a 670 nm), responsável pela emissão da luz para detecção.
- **Sensor LDR** (Light Dependent Resistor), que capta a intensidade da luz refletida.
- **Resistores** de 100,Ω, 220,Ω e 4,7,kΩ, usados para ajuste dos circuitos elétricos.
- **Amplificador operacional LM741**, empregado para amplificação do sinal captado pelo sensor.
- **Arduino Nano**, escolhido para reduzir o tamanho do protótipo e processar os sinais adquiridos.

- **Push button**, utilizado para ligar e desligar o dispositivo.
- **Filtro de gelatina vermelha**, que bloqueia a luz ambiente e melhora a precisão da detecção ao focar na luz do laser.

A modelagem e impressão 3D do protótipo foram realizadas utilizando o software *SolidWorks*. Inicialmente, foi projetada uma caneta em PLA para abrigar o circuito e facilitar o manuseio durante os testes. A caneta foi desenvolvida para garantir portabilidade no uso do dispositivo. Para a montagem física da placa, optou-se por uma configuração de duas camadas com 50% de densidade e cor cinza, visando otimizar tanto a resistência quanto a estética do protótipo.

Além disso, a arcada dentária também foi modelada no *SolidWorks* para simular de maneira mais realista o ambiente bucal, permitindo que os testes fossem realizados com maior precisão. Na arcada, foram implantados dentes reais previamente avaliados, incluindo dentes com e sem cáries, além de restaurações realizadas com resina e amálgama. O suporte para abrigar a arcada foi feito de Pannel de Fibra de Densidade Média (MDF) com 3 mm de espessura, garantindo um suporte adequado para os testes.

Os testes iniciais foram realizados com luz ambiente controlada, com o objetivo de avaliar a resposta do sensor LDR em condições ideais. As medições foram feitas a distâncias de 5 cm e 10 cm entre os dentes e o dispositivo, pois nestas distâncias obteve-se melhores resultados. No entanto, mesmo com a luz ambiente controlada, o sensor LDR ainda captava variações de luminosidade, resultando em leituras inconsistentes. Com a adição do filtro de gelatina vermelha, os testes mostraram uma melhoria significativa na precisão das leituras, garantindo que o sensor LDR detectasse apenas a luz refletida do laser, reduzindo as interferências externas. Os dados obtidos foram organizados em planilhas do Excel, onde foram calculadas as médias e os desvios padrão das leituras para cada condição de teste. Gráficos comparativos foram gerados, mostrando uma melhora na precisão após a adição do filtro vermelho.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, o dispositivo foi montado utilizando uma protoboard, o que resultou em imprecisões nas leituras. A protoboard, por ser uma solução temporária, causava ruídos e instabilidade nas medições, comprometendo a precisão dos resultados. Além disso, foi observado que os jumpers utilizados na montagem elétrica geravam interferências nos sinais, resultando em leituras inconsistentes durante os testes.

A Figura 1 apresenta o protótipo inicial.

O dispositivo, apesar de funcional, não possuía a rigidez necessária para uma operação consistente, e a ausência de um sistema adequado para bloquear a luz ambiente contribuía para a imprecisão dos dados. Durante os testes iniciais, as leituras foram mais confiáveis apenas nas superfícies oclusais dos dentes, enquanto as faces vestibular e lingual apresentaram maior variabilidade. Mesmo nessas condições, os resultados exigiam ajustes devido à interferência da luz externa, afetando a qualidade da detecção.

Foram analisados dentes com cáries, sem cáries, com restauração em resina e com amálgama, e tanto os resultados numéricos quanto gráficos apresentaram valores anormais.

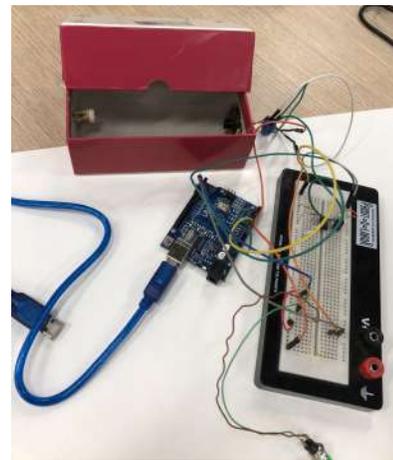


Fig. 1. Montagem Física do protótipo inicial.

Essas inconsistências foram atribuídas, principalmente, à qualidade do circuito e à falta de um filtro adequado para bloquear a luz ambiente.

Com a evolução do projeto, a transição da protoboard para uma placa de circuito impresso (PCB) representou um avanço significativo. A criação da PCB resultou em um dispositivo mais eficiente e estável, proporcionando uma melhor integração dos componentes e a redução dos ruídos elétricos. Esse aprimoramento impactou diretamente a precisão das medições, tornando os resultados mais consistentes. A Figura 2 ilustra essa evolução.

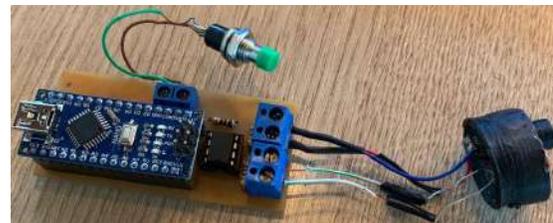


Fig. 2. PCB personalizada.

Outro aprimoramento fundamental foi a adição de um filtro de gelatina vermelha, que reduziu significativamente as interferências da luz externa. Esse filtro permitiu que o dispositivo captasse apenas a luz refletida pelo laser, aumentando a precisão do sensor LDR e garantindo medições mais confiáveis. A dificuldade inicial em obter valores precisos foi superada com a implementação desse filtro, que demonstrou ser essencial para a estabilidade do sistema.

Além dessas melhorias, foi desenvolvida uma arcada dentária impressa em 3D para simular de maneira mais realista o ambiente bucal. Isso possibilitou a realização de testes mais precisos e representativos, considerando diferentes condições dentárias, como presença de cáries, restaurações e dentes saudáveis. O suporte da arcada foi confeccionado em MDF de 3 mm de espessura, proporcionando maior estabilidade durante os testes. A Figura 3 ilustra a arcada dentária utilizada nos experimentos.

Outra inovação importante foi a modelagem e impressão 3D de uma caneta em PLA. No entanto, durante o desenvolvimento dessa peça, um dos desafios enfrentados foi projetar corretamente os encaixes entre as partes que compõem a estrutura



Fig. 3. Arcada dentária impressa em 3D.

da caneta. O design foi elaborado no software *SolidWorks* e dividido em duas partes principais: uma destinada ao laser e ao sensor LDR e outra para acomodação do circuito eletrônico. A falta de precisão no encaixe dessas partes gerou dificuldades no processo de montagem, sendo necessário realizar ajustes no projeto para garantir um acoplamento adequado.

As Figuras 4 e 5 apresentam a modelagem da caneta e sua versão impressa em 3D.

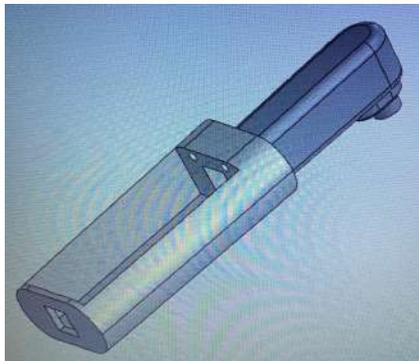


Fig. 4. Modelagem da caneta no *SolidWorks*.



Fig. 5. Impressão 3D da caneta.

Os dados obtidos durante os testes foram organizados em planilhas do Excel, onde foram calculadas as médias e os desvios padrão das leituras do LDR para cada condição dentária. A Figura 6 mostra os testes realizados, enquanto a Figura 7 apresenta os gráficos comparativos das medições obtidas.

	COM CÁRIE	SEM CÁRIE	AMÁLGAMA	Resina
	126	132,2	123,5	131,5
	126	132,2	123,6	132
	126	132,2	123,6	132,3
	126	132,2	123,6	132,6
	126	132,1	123,6	133
	126	132,1	123,6	133,2
	126	132,1	123,7	133,5
	126	132,1	123,8	133,7
	126	132,1	123,9	134
	126	132,1	124	134,2
	125,96	132,1	124,6	135,5
	126	132,1	124,6	135,2
	126	132	124,5	135,1
	126	132	124,6	134,9
	126	132	124,7	134,7
MÉDIA	125,99733	132,10667	123,99333	133,69333
DESVIO	0,010328	0,0703732	0,4636296	1,2509806

Fig. 6. Testes experimentais do dispositivo aprimorado.

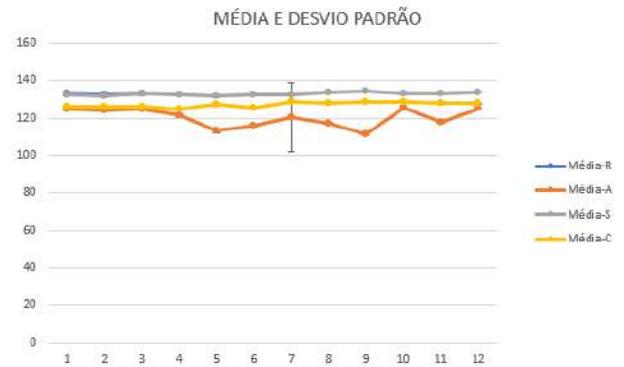


Fig. 7. Gráficos comparativos dos testes.

Durante os experimentos, também foi observado que, em algumas ocasiões, os jumpers utilizados no circuito elétrico causavam interferências nas medições, resultando em valores inconsistentes. Esse problema foi identificado como um dos principais fatores responsáveis pelas variações indesejadas nos resultados iniciais. A substituição dos jumpers por conexões mais estáveis na PCB ajudou a mitigar essas interferências, garantindo maior confiabilidade nas leituras.

Os resultados do projeto mostram uma evolução significativa no desempenho do dispositivo de detecção de cáries. Inicialmente, o protótipo com a protoboard apresentou imprecisões devido à instabilidade elétrica e interferências externas. A transição para a PCB e a adição do filtro de gelatina vermelha solucionaram esses problemas, aumentando a precisão das medições.

Além disso, a modelagem 3D da arcada dentária e o desenvolvimento da caneta em PLA contribuíram para a realização de testes mais realistas, facilitando o manuseio do dispositivo e aprimorando sua aplicabilidade prática. A análise quantitativa das medições demonstrou uma melhoria significativa na precisão do sistema, especialmente nas faces vestibular e lingual dos dentes.

Com essas melhorias, o dispositivo aprimorado mostrou-se mais confiável e eficiente, representando um avanço importante no diagnóstico de cáries dentárias e viabilizando seu uso futuro em ambientes clínicos e comunitários.

IV. CONCLUSÃO

O aprimoramento do dispositivo de detecção de cáries, com a introdução de uma PCB personalizada e a caneta portátil, trouxe um avanço significativo em relação à versão anterior, oferecendo maior estabilidade e usabilidade ao sistema. A adição do filtro de gelatina vermelha reduziu a interferência da luz ambiente, aumentando a precisão das medições, especialmente na face oclusal dos dentes.

A implementação da caneta em PLA e a modelagem da arcada dentária representaram melhorias na ergonomia e precisão do dispositivo de detecção de cáries. A caneta em PLA, mais leve e durável, proporcionou maior conforto durante o uso, enquanto a arcada dentária foi aprimorada para simular condições mais reais, facilitando o diagnóstico.

O objetivo desta versão foi aprimorar o projeto inicial, para se tornar portátil e funcional. A próxima etapa consiste na submissão do projeto ao comitê de ética, viabilizando experimentos em condições reais. Esse processo será fundamental para validar sua eficácia e possibilitar sua futura aplicação em ambientes clínicos e comunitários, como postos de saúde e escolas.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, ao Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, e ao eHealth Lab pelo apoio técnico e recursos que viabilizaram a continuidade e aprimoramento deste projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Ana Beatriz dos Santos Mariano, Thomas Ceccon Guimarães e Luma Rissatti Borges do Prado. “Dispositivo de Avaliação de Saúde Bucal Infantil com Solução de Baixo Custo”. Em: *Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel* (2023). URL: [Artigo_Odonto.pdf](#).
- [2] Simone de Melo et al. COSTA. “Desigualdades na distribuição da cárie dentária no Brasil: uma abordagem bioética.” Em: *Ciência Saúde Coletiva* 18 (2013), pp. 461–470. ISSN: 0164-1212. URL: www.scielo.br/j/csc/a/prJGG6fvSVGLbcwbgDY9b6r/.
- [3] Fátima R. R. Bagnato. “FATMASTER – Um sistema laser para remoção de cáries e preparo cavitário”. Em: *Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto - USP* (2025). URL: <https://www.forp.usp.br/restauradora/laser/fatima.html/fatmaster.html>.
- [4] Irina SHUMRANOVA. “Novos meios de diagnóstico para detectar a cárie dentária”. Em: (2012). URL: repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/86403/2/161127.pdf.

AUTORES



Thomas Ceccon Guimarães

Graduando no 9º período de Engenharia da Computação no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), bolsista de iniciação científica no eHealth Innovation Center.



Elisa Rennó de Carneiro Dester

Fisioterapeuta formada pela Universidade Gama Filho (RJ) em 1999; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela Universidade Castelo Branco (RJ) em 2003; Professora do curso de pós-graduação em Engenharia Clínica e Biomédica do Inatel; Professora do curso de Engenharia Biomédica do Inatel.



Luma Rissatti Borges do Prado

Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, mestranda em Engenharia Biomédica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Especialista no Inatel atuando como coordenadora de projetos do eHealth Innovation Center do Inatel e líder técnica de Engenharia Biomédica do Inatel Compence Center. Professora de Design de Tecnologias Médicas do curso técnico em eletrônica da Escola Técnica de Eletrônica “FMC”.



Rita Elizabeth Santos de Almeida

Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, técnica em equipamentos médicos pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco Moreira da Costa. Especialista em sistemas no Inatel, atuando como coordenadora de projetos no eHealth Innovation Center.

Sistema de Interface Acessível para Comunicação e Automação Residencial a Pessoas com Esclerose Lateral Amiotrófica

Nathalia Ap. Al. Costa, Vitor T. Gonzaga, Elisa Renno C. Dester, Filipe Bueno Vilela, Rita Elizabeth S. de Almeida
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
nathalia.aparecida@ges.inatel.br, vitor.t@ges.inatel.br, elisa.renno@inatel.br, filipe.bueno@inatel.br, r.elizabeth@inatel.br

Abstract—This paper presents the development of an accessible interface system for communication and home automation aimed at individuals with Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS). The proposed system utilizes eye-tracking technology to enable users to interact with a computer interface, facilitating communication and control of home devices through Amazon Alexa integration. Additionally, the system supports rapid message sending via Telegram, enhancing autonomy and quality of life for ALS patients. The research includes system implementation, testing, and validation to ensure accessibility and usability.

Index Terms—Accessible interface, ALS, eye tracking, home automation.

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de interface acessível para comunicação e automação residencial destinado a indivíduos com Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA). O sistema proposto utiliza tecnologia de rastreamento ocular para permitir que os usuários interajam com uma interface computacional, possibilitando a comunicação e o controle de dispositivos residenciais via integração com a Amazon Alexa. Além disso, o sistema viabiliza o envio rápido de mensagens pelo Telegram, promovendo maior autonomia e qualidade de vida aos pacientes com ELA. A pesquisa inclui a implementação, testes e validação do sistema para garantir acessibilidade e usabilidade.

Palavras chave—Automação residencial, ELA, interface acessível, rastreamento ocular.

I. INTRODUÇÃO

A Esclerose Lateral Amiotrófica (ELA) é uma doença neuromuscular degenerativa progressiva que afeta a função motora e a comunicação das pessoas acometidas. À medida que a doença progride, os indivíduos perdem a capacidade de se mover voluntariamente e de se comunicar verbalmente, levando a uma significativa perda de autonomia e qualidade de vida. Tornar possível a comunicação e o controle de recursos em um ambiente residencial é essencial para melhorar a qualidade de vida dessas pessoas, proporcionando-lhes independência e acesso a um ambiente adaptado às suas necessidades [1].

Atualmente, a tecnologia assistiva para pessoas com ELA inclui rastreamento ocular, que utiliza câmeras e algoritmos para monitorar os movimentos oculares do usuário. Essa técnica permite que o usuário controle um cursor na tela por meio do direcionamento visual, possibilitando a seleção de palavras, frases e ações pré-programadas para comunicação e controle de recursos [2]. Outro exemplo são as interfaces cérebro-computador (BCI) e o uso de sensores mecanográficos (MMG), que detectam a atividade elétrica dos músculos subjacentes

à pele, permitindo que os usuários controlem dispositivos e recursos por meio de sinais musculares remanescentes [3].

Tecnologias já existentes, como o Tobii, utilizam *hardwares* e acessórios externos, como câmeras oculares e suportes, para oferecer a funcionalidade de rastreamento ocular [4]. Esses sistemas, no entanto, podem ser elevados em termos de custo, o que os torna inacessíveis para muitas pessoas que necessitam de uma solução assistiva. O preço dos dispositivos da Tobii, por exemplo, pode variar entre 2.000 e 10.000 dólares, dependendo das configurações e do tipo de suporte incluído. Isso coloca desafios adicionais na adoção dessas tecnologias, especialmente para pessoas com recursos financeiros limitados.

Sistemas de automação residencial, integrados a assistentes virtuais como a Alexa, e cadeiras de rodas motorizadas personalizadas oferecem maior autonomia. Além disso, avanços em automação residencial têm permitido a integração de dispositivos eletroeletrônicos em uma rede inteligente, facilitando o controle e o gerenciamento desses recursos por meio de interfaces customizadas e acessíveis [5]. No entanto, os custos elevados e as barreiras de acesso ainda são desafios, o que destaca a necessidade de soluções mais acessíveis.

O objetivo deste trabalho é criar um sistema que proporcione maior autonomia aos pacientes e ofereça alternativas de comunicação para aqueles que perderam a capacidade da fala, utilizando apenas um computador com *webcam*. Para isso, propõe a utilização da tecnologia de rastreamento ocular (*eye tracking*), a fim de, permitir controle do cursor do computador com o movimento dos olhos.

II. METODOLOGIA

A interface foi desenvolvida utilizando o *framework Flutter* e a linguagem de programação *Dart*. A escolha se deve ao fato de ser uma tecnologia multiplataforma e de fácil uso, permitindo a criação de uma interface acessível e responsiva. No projeto, foram utilizadas as bibliotecas padrão da linguagem, além de pacotes personalizados para integração com dispositivos externos e serviços de comunicação.

A implementação do rastreamento ocular (*eye tracking*) foi realizada em *Python*, por meio da biblioteca *MediaPipe*. A preferência por essa tecnologia se deu pela facilidade de implementação e pela vasta documentação disponível. A biblioteca é capaz de detectar rostos e criar uma máscara de pontos imaginária, permitindo a identificação das variações de movimento e, assim, o controle do cursor. Com isso, foi

feita a integração entre a interface e o rastreamento ocular, possibilitando que os usuários interajam com o aplicativo movendo o cursor do computador apenas com o movimento dos olhos.

A interface conta com diversas funcionalidades voltadas para acessibilidade e automação residencial. Entre elas, destacam-se a possibilidade de implementação do controle de janelas, luzes, ar-condicionado e ventiladores, proporcionando maior autonomia ao usuário, como pode ser visualizado na Figura 1.



Fig. 1. Página Inicial

Além disso, há um comunicador integrado, permitindo que mensagens predefinidas sejam enviadas rapidamente para contatos cadastrados, incluindo funcionalidades de emergência para acionamento imediato, como por exemplo: estou bem, preciso de ajuda, estou com fome e entre outras. A integração com o Telegram possibilita o envio de mensagens automáticas e alertas, garantindo comunicação eficiente em situações críticas, como pode ser visualizado na Figura 2.



Fig. 2. Página do Comunicador

Quando a mensagem é enviada, uma notificação é exibida na tela do aplicativo para confirmar o envio. Essa funcionalidade aplica-se tanto às mensagens predefinidas quanto à mensagem de emergência. Esta última pode ser enviada a partir de qualquer tela do aplicativo, pois possui um botão específico presente em todas as páginas, neste caso a mensagem de socorro é enviada a um grupo normal do Telegram, que inclui cuidadores e familiares, garantindo que as mensagens de emergência sejam recebidas pelo maior número possível de pessoas, conforme ilustrado na Figura 3.



Fig. 3. Confirmação do pedido de ajuda

O aplicativo também conta com uma tela de configuração onde o usuário pode selecionar para qual contato a mensagem será enviada as mensagens rápidas. Nessa interface, são exibidos todos os contatos que já interagiram com o bot @InterfaceBotELA no Telegram, permitindo o envio tanto para uma pessoa específica quanto para um grupo predefinido citado anteriormente, conforme ilustrado na Figura 4.

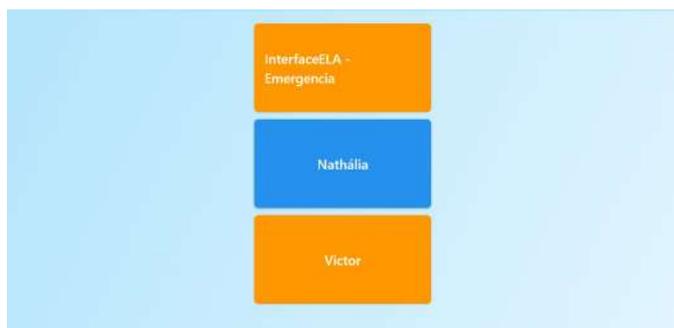


Fig. 4. Configuração de contatos para envio de mensagens rápidas

O *Visual Studio Code (VSCode)*, foi utilizado para o desenvolvimento da interface devido à sua leveza, suporte a diversas linguagens e extensões, além de ser altamente personalizável. Ele oferece recursos como *IntelliSense*, depuração e integração com controle de versão, tornando-se uma escolha eficiente para a construção de interfaces gráficas.

Por outro lado, a *IDE PyCharm* foi empregada no desenvolvimento do rastreamento ocular devido ao seu foco específico em *Python*. Ele possui ferramentas avançadas para desenvolvimento nessa linguagem, como suporte integrado para bibliotecas de *machine learning*, análise de código, sugestões inteligentes e um ambiente de depuração mais robusto, facilitando o desenvolvimento de algoritmos complexos.

A principal diferença entre eles é que o *VSCode* é um editor de código mais flexível e leve, adequado para diferentes tecnologias, enquanto o *PyCharm* é um ambiente de desenvolvimento integrado (*IDE*) mais completo e especializado para *Python*, oferecendo recursos otimizados para projetos.

O sistema foi projetado para permitir a conexão com dispositivos de automação residencial, possibilitando o controle de luzes, janelas, ventiladores, ar-condicionado e outros elementos do ambiente de forma simples e intuitiva. Embora a integração com assistentes virtuais, como a *Amazon Alexa*, ainda não tenha sido implementada, o código foi estruturado de forma

modular, permitindo futuras adaptações para essa funcionalidade.

Testes foram realizados em laboratório para verificar a precisão do rastreamento ocular e a resposta do sistema em cenários reais de uso. Os testes foram conduzidos com a pessoa posicionada em frente ao computador, a aproximadamente 40 cm de distância da câmera, e sem luz direta. Ambientes com pouca iluminação ou com luz direta podem comprometer o desempenho do sistema. Durante os testes, foram avaliados aspectos como a facilidade de navegação, o tempo de resposta dos comandos e a estabilidade da comunicação com os dispositivos conectados. Após ajustes baseados nos resultados, o sistema final foi validado para uso, atendendo às demandas específicas de acessibilidade e funcionalidade.

III. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Os testes realizados demonstraram que o sistema é capaz de interpretar com precisão razoável os movimentos oculares, permitindo que os usuários realizem interações com a interface. No entanto, foi notado que ajustes na sensibilidade e na calibração da câmera são necessários para otimizar a resposta do sistema e reduzir variações inesperadas no rastreamento. Melhorias no modelo foram implementadas, incluindo a refatoração do código e a otimização da leitura de toda a tela, resultando em um rastreamento ocular mais estável e responsivo.

A interface intuitiva, juntamente com a atualização em tempo real das informações, contribuiu para uma experiência mais fluida e de fácil utilização. Durante o desenvolvimento, foi explorado diferentes bibliotecas de rastreamento ocular, como *PyGaze*, *MediaPipe* e *OpenCV*, foram realizados testes para determinar quais ofereciam a melhor confiabilidade. A escolha final recaiu sobre *OpenCV* e *MediaPipe* devido à sua maior precisão e suporte ativo da comunidade.

Um dos principais desafios enfrentados foi a calibração do *eye tracking*, que exigiu ajustes contínuos para garantir um funcionamento adequado. Percebeu-se que, para um melhor desempenho, era necessário um leve movimento da cabeça do usuário, facilitando a captação do olhar pela câmera. Além disso, melhorias foram realizadas no algoritmo de inferência, eliminando funções desnecessárias e reduzindo o tempo de processamento. Embora essas otimizações tenham aprimorado significativamente a performance, futuros ajustes podem explorar o uso de *GPU (Graphics processing unit)* para acelerar a inferência e minimizar atrasos.

Outro ponto de destaque foi a implementação e refinamento da conexão entre a interface e o Telegram para o envio de mensagens rápidas. A possibilidade de configurar o destinatário das mensagens foi incorporada e testada com sucesso. Durante os testes, foi notado a necessidade de aprimorar a estabilidade do clique do mouse, evitando o efeito de "flickering", o que foi corrigido em versões subsequentes do sistema. Como sugestão para futuras atualizações, propõe-se a inserção de um mecanismo de detecção de erros e a integração com uma segunda plataforma, como *e-mail*, para envio de notificações de emergência em casos de falha na comunicação via Telegram.

Além dos benefícios diretos às pessoas com ELA, o projeto apresenta potencial para aplicação em outras áreas de tecno-

logia assistiva, podendo beneficiar indivíduos com diferentes tipos de paralisia ou dificuldades motoras. A validação do protótipo funcional reforça a viabilidade da proposta e abre caminho para avanços futuros, tanto na personalização dos recursos quanto na expansão das funcionalidades disponíveis. A integração com assistentes virtuais, como a Alexa, também é uma possibilidade promissora que pode aumentar ainda mais a acessibilidade e a autonomia dos usuários. Um exemplo dessa integração é ilustrado na Figura 5, que apresenta uma interface de controle de janelas desenvolvida para ser compatível com a Alexa.

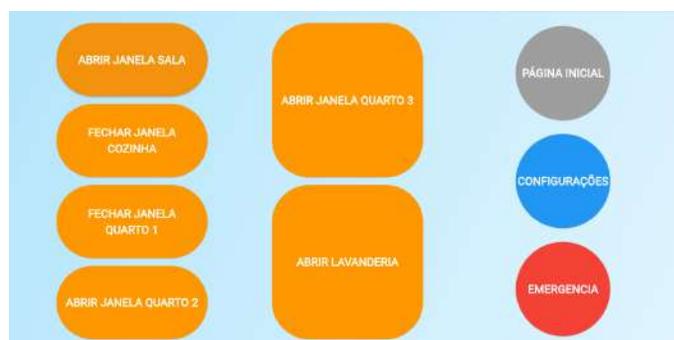


Fig. 5. Página de controle de Janelas

Por fim, o projeto passou por diversas iterações, incorporando feedbacks de usuários e especialistas, o que permitiu aprimorar a interface e as funcionalidades do sistema. A primeira versão do aplicativo em *Flutter* foi desenvolvida e, ao longo do processo, novas telas foram adicionadas e testadas. O teclado virtual foi definido como a melhor opção para facilitar a digitação de mensagens, contribuindo para uma experiência mais eficiente. O avanço dessas melhorias demonstra que o sistema possui um grande potencial de impacto positivo, tanto na qualidade de vida dos usuários quanto no avanço da pesquisa em tecnologia assistiva.

IV. CONCLUSÃO

O sistema de interface acessível para comunicação proposto neste trabalho demonstrou grande potencial para atender às necessidades de pessoas com ELA. A tecnologia desenvolvida, baseada no rastreamento ocular, mostrou-se viável em termos de usabilidade e funcionalidade em ambiente controlado, indicando uma solução promissora para melhorar a qualidade de vida e a autonomia dos usuários. Embora ainda não tenha sido testada em um ambiente real, a proposta abre caminho para futuras implementações e adaptações.

A interface utiliza o rastreamento ocular como principal meio de interação, permitindo que o usuário se comunique sem a necessidade de movimentos físicos complexos. No entanto, para que o rastreamento seja eficaz, é necessário que o usuário faça pequenos ajustes na posição da cabeça. Esses ajustes são naturais durante o uso, mas um ambiente adequado é essencial para garantir a precisão do sistema.

Além de atender pessoas com ELA, o sistema pode beneficiar indivíduos com outras condições que limitam a mobilidade. Sua flexibilidade permite a adaptação a diferentes necessidades, tornando-se uma ferramenta útil para ampliar a acessibilidade à comunicação assistiva. O sistema foi projetado

para ser intuitivo e funcional, com ajustes contínuos baseados no *feedback* dos pesquisadores, garantindo sua usabilidade mesmo para indivíduos com mobilidade severamente limitada. Sua viabilidade foi testada e aprimorada, buscando oferecer uma experiência eficiente e prática para os usuários.

Como consideração futura, a integração do sistema com dispositivos de automação residencial, como controle de luzes e aparelhos eletrônicos, poderia ampliar suas funcionalidades e proporcionar ainda mais autonomia aos usuários. Além disso, a possibilidade de integração com assistentes virtuais, como a Alexa, pode ser explorada para expandir os meios de interação e facilitar tarefas cotidianas.

Dada a importância dessa pesquisa, é fundamental que mais estudos sejam realizados na área. O aprimoramento contínuo dessas tecnologias pode levar a soluções ainda mais eficazes e acessíveis, beneficiando um número crescente de pessoas e ampliando as possibilidades de inclusão e independência.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) pelo apoio oferecido ao projeto. Agradecemos também à Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (FINATEL) pelo suporte financeiro e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de pesquisa.

V. REFERÊNCIAS

[1] ABREU-FILHO, Antonio; OLIVEIRA, Acary; SILVA, Helga. PSYCHOLOGY AND SOCIAL ASPECTS OF AMYOTROPHIC LATERAL SCLEROSIS: review. *Psicologia, Saúde Doença*, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 88-100, 31 mar. 2019. Sociedade Portuguesa de Psicologia da Saude.

[2] EDUGHELE, Hilary O.; ZHANG, Yinghui; MUHAMMAD-SUKKI, Firdaus; VIEN, Quoc-Tuan; MORRIS-CAFIERO, Haley; AGYEMAN, Michael Opoku. Eye-Tracking Assistive Technologies for Individuals With Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Ieee Access*, [S.L.], v. 10, p. 41952-41972, 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

[3] WOODWARD, Richard B.; STOKES, Maria J.; SHEFELBINE, Sandra J.; VAIDYANATHAN, Ravi. Segmenting Mechanomyography Measures of Muscle Activity Phases Using Inertial Data. *Scientific Reports*, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-12, 3 abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

[4] TOBII Brasil. Tobii Dynavox Healthcare para UTI. Disponível em: <https://www.tobii brasil.com/produto/tobii-dynavox-healthcare-para-uti/>. Acesso em: 16 mar. 2025.

[5] SOUSA, Carlos Ribeiro de; LOPES, Rogério Santiago. Automação residencial: conhecimento sobre a existência e a importância do uso por pessoa com deficiência física - usuário de cadeira de rodas em redefinição - pa, brasil. *Research, Society And Development*, [S.L.], v. 11, n. 15, p. 562111537615-562111537622, 26 nov. 2022. Research, Society and Development.

[6] ALBUQUERQUE, Keila Maruze de França; PERNAMBUCO, Leandro; LOPES, Leonardo Wanderley. Impacto do tratamento medicamentoso na voz, fala e deglutição de pacientes com esclerose lateral amiotrófica: revisão sistemática.

Audiology - Communication Research, [S.L.], v. 27, p. 1-12, 2022. FapUNIFESP

AUTORES



Vitor Torres Gonzaga, estudante de Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel e possui formação técnica em Eletroeletrônica pelo CTIG - UNESP (2020). Seus principais interesses incluem desenvolvimento web, abrangendo front-end e back-end, além da área de DevOps. Busca aprimorar suas habilidades em explorar práticas de automação, integração contínua, entrega contínua e gerenciamento de infraestrutura para otimizar o ciclo de desenvolvimento de software.



Nathália Aparecida Almeida Costa, estudante de Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) e possui formação técnica em Eletrônica pela ETE FMC. Com experiência em desenvolvimento de software embarcado e backend, já atuou em projetos voltados para rastreamento ocular, automação e sistemas de chamada de emergência, utilizando tecnologias como Python, Flutter e visão computacional.

ORIENTADORES



Rita Elizabeth Santos de Almeida Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, técnica em equipamentos médicos pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco Moreira da Costa. Especialista em sistemas no Inatel, atuando como coordenadora de projetos no eHealth Innovation Center.



Me. Prof. Filipe B. Vilela engenheiro Biomédico graduado pelo Inatel, com graduação sanduíche pela Milwaukee School of Engineering (MSOE) e Illinois Institute of Technology (IIT). Professor do Inatel. Professor orientador do centro de pesquisas em Engenharia Biomédica eHealth Innovation Center - Inatel. Pesquisador na área de biomateriais pela Unifei. Pesquisador visitante na Empa/ETH Domain, Saint Gallen. Engenheiro-voluntário no Hospital Antônio Moreira da Costa. Pesquisador visitante da Universidad de Concepción.

CO-ORIENTADOR



Elisa Rennó de Carneiro Dester

Fisioterapeuta formada pela Universidade Gama Filho (RJ) em 1999; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela Universidade Castelo Branco (RJ) em 2003; Professora do curso de pós-graduação em Engenharia Clínica e Biomédica do Inatel; Professora do curso de Engenharia Biomédica do Inatel.

Conceção de uma cabina estéril automatizada para o cultivo de amostras biológicas

Rocío Isabel Miranda Zamora

Universidad Privada del Valle - UNIVALLE

MZR2019405@est.univalle.edu

Abstract - The design of an Automated Sterile Cabinet arises as a solution to the problems of contamination and lack of control in the cultivation of biological samples. This equipment allows creating a controlled and stable environment by monitoring critical parameters such as temperature, humidity and CO₂, optimizing experimental processes.

The automated system includes high-precision sensors and actuators, controlled by a microcontroller with wireless communication to a monitoring web page. This design ensures the transmission and storage of data for analysis and report generation and reduces the time of interaction of the operator with the equipment. In addition, a UV-C light disinfection system significantly reduces contamination, improving the quality of the culture and the results.

Index terms - Sterile cabinet, Automation, Biological cultivation, Environmental control.

Resumo - A conceção de uma cabine estéril automatizada é uma solução para os problemas de contaminação e falta de controlo no cultivo de amostras biológicas. Este equipamento permite a criação de um ambiente controlado e estável através da monitorização de parâmetros críticos como a temperatura, humidade e CO₂, optimizando os processos experimentais.

O sistema automatizado inclui sensores e actuadores de alta precisão, controlados por um microcontrolador com comunicação sem fios para um website de monitorização. Esta conceção assegura a transmissão e o armazenamento de dados para análise e elaboração de relatórios e reduz o tempo de interação do operador com o equipamento, e um sistema de desinfeção UV-C reduz significativamente a contaminação, melhorando a qualidade das colheitas e os resultados.

Palavras-chave - Câmara esterilizada, Automação, Cultura biológica, Controlo ambiental.

I. INTRODUÇÃO

No estudo do crescimento microbiano em amostras biológicas, é essencial dispor de uma estação de incubação que permita um controlo preciso da temperatura e da humidade. Estas condições são essenciais para caracterizar corretamente as diferentes fases de desenvolvimento dos microrganismos, especialmente os de interesse clínico, como os patogénicos. Além disso, um ambiente controlado facilita a implementação de novos métodos de deteção rápida aplicáveis a amostras como a urina ou o sangue [1].

A esterilidade e o controlo rigoroso das condições de cultura são factores determinantes para o sucesso de qualquer experiência

biológica. Neste sentido, a automatização destes processos oferece múltiplos benefícios, tais como a redução do erro humano, a melhoria da reprodutibilidade e a otimização do tempo de trabalho no laboratório [2]. A automatização é fundamental na investigação biotecnológica, pois permite uma monitorização contínua e um controlo preciso do ambiente de cultura, fundamentais para a investigação [3].

A implementação de uma câmara estéril automatizada representa uma solução eficaz para estes desafios, uma vez que proporciona um ambiente controlado com parâmetros ajustáveis, como a temperatura, a humidade e a concentração de dióxido de carbono (CO₂). Além disso, a integração de luz UV-C para desinfeção contínua ajuda a reduzir a taxa de contaminação, melhorando a qualidade científica e a autenticidade das amostras. Este equipamento destaca-se ainda pela sua versatilidade, uma vez que pode ser adaptado aos requisitos específicos de diferentes tipos de amostras, alargando o leque de experiências possíveis e reforçando a capacidade de investigação do laboratório. A utilização de tecnologias avançadas em equipamento de laboratório permite criar condições óptimas para procedimentos especializados, apoiando assim o desenvolvimento científico [4].

A utilização de equipamento automatizado e de sistemas de controlo nos laboratórios é uma tendência crescente que simplifica as actividades experimentais e melhora a sua eficiência. A sua implementação garante o cumprimento das normas e regulamentos de biossegurança [5]. Neste contexto, uma câmara estéril automatizada para a cultura de amostras biológicas não só reduz o risco de contaminação, garantindo resultados mais fiáveis e reprodutíveis, como também optimiza os tempos de cultura e aumenta a taxa de sucesso das experiências. Além disso, a utilização de tecnologia avançada favorece a geração de dados robustos e publicáveis, promovendo a colaboração interdisciplinar e contribuindo para o avanço do conhecimento científico.

II. METODOLOGÍA

Inicialmente, foi feita uma revisão exaustiva das condições necessárias para o cultivo de amostras biológicas, considerando parâmetros-chave como a temperatura, a humidade e a concentração de dióxido de carbono. Para além disso, foram analisadas as características que o equipamento deve cumprir em termos dos diferentes tipos de câmaras de cultura disponíveis no mercado. Para além disso, foi determinado o princípio de funcionamento do sistema, nomeadamente o tipo de condução

térmica mais adequado. Para garantir um ambiente limpo e minimizar a contaminação das amostras durante o processo de cultivo, foi implementado um sistema de desinfecção por luz ultravioleta.

Além disso, para permitir a monitorização remota, reduzir a interação direta dos operadores com os equipamentos e garantir a automatização dos processos, foi incorporado o conceito de Internet das Coisas Médicas (IoMT). Para tal, foi desenvolvida uma interface web compatível com diferentes dispositivos, permitindo a monitorização em tempo real, o registo e o reporte dos processos realizados.

Todas as tecnologias implementadas foram seleccionadas com base nas necessidades das amostras biológicas durante o seu período de cultura, bem como na disponibilidade e acessibilidade destes sistemas no mercado. Com este sistema representado na figura 1, o objetivo é não só otimizar os resultados das experiências, mas também reduzir os custos e minimizar o risco de contaminação.

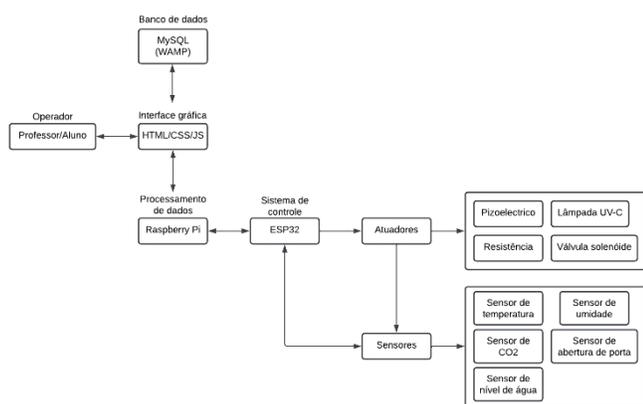


Fig. 1. Diagrama do projeto.

A. Seleção de tecnologias

A seleção do sensor baseou-se em vários factores-chave. Em primeiro lugar, foi considerada a resolução do sensor, uma vez que esta característica determina a variação mais pequena no valor que o sensor pode detetar ou registar. Além disso, a precisão de cada sensor foi analisada, o que é fundamental porque reflecte o grau em que a medição corresponde ao valor real ou esperado.

Estas duas características foram essenciais para a escolha do sensor correto, uma vez que são necessárias medições precisas e estabilidade a longo prazo em equipamentos de laboratório. Outro fator importante na seleção foi a acessibilidade do sensor no mercado nacional e o custo de aquisição, bem como os acessórios necessários para complementar as medições.

A.1) Sensor de temperatura

Para a temperatura, foi escolhido o sensor RTD-PT100, para entender o seu funcionamento, os sensores Pt100 são um tipo específico de sensor de temperatura RTD (Resistance Temperature Detetor). O destaque dos sensores Pt100 é que

eles são feitos de platina, com uma resistência elétrica de 100 ohms a 0 °C, sendo o tipo mais comum de sensor RTD.

TABLA 1

RESISTENCIA SEGÚN TEMPERATURA

Temperatura [Celsius]	PT100 resistencia [Ohms]
0	100
10	103.9
20	107.79
30	111.67
40	115.54
50	119.4
60	123.24
70	127.08
80	130.9
90	134.71

Como o sensor RTD Pt100 mede a temperatura através de variações na sua resistência, é necessário utilizar transmissores de temperatura que convertam esta resistência num sinal de corrente. Para obter o valor da temperatura em graus Celsius, é utilizado um módulo transmissor de temperatura com saída 4-20 mA, que gera uma corrente proporcional ao valor da temperatura medida. Para que este sinal possa ser interpretado pelo microcontrolador.

É necessário aplicar a equação do declive (1), para determinar a temperatura em função da tensão de entrada, tendo em conta que é utilizada uma resistência de 220Ω para a transformação de corrente em tensão..

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) \quad (1)$$

A partir desta equação, podemos determinar:

$$T = \left(\frac{75}{4}\right) \left(\frac{V_o}{220\Omega} - 4\right) \quad (2)$$

Este valor de tensão será lido pelo microcontrolador e, utilizando o código digital implementado, introduzido na equação (2) para determinar a temperatura ambiente..

A.2) Sensor de humidade

O sensor de humidade relativa (HR) utilizado neste projeto é o AHT20, este sensor funciona através de uma célula capacitiva de alta precisão, com uma margem de erro de ±2%, e pode medir uma gama completa de humidade relativa, de 0% a 100% HR..

O AHT20 gera um sinal de saída proporcional às variações de humidade detectadas no seu ambiente. Para traduzir este sinal num valor digital que representa a humidade relativa, é necessário utilizar a fórmula de conversão (3) para garantir a interpretação correta dos dados obtidos. Este processo garante

que as medições sejam precisas e úteis para o controlo do sistema..

$$RH[\%] = \left(\frac{S_{RH}}{2^{20}} \right) * 100\% \quad (3)$$

S_{RH} : é o valor analógico enviado do sensor para o microcontrolador.

A.3) Sensor de dióxido de carbono

Para a monitorização do CO₂, é utilizado o módulo de gás por infravermelhos NDIR SCD41. O sensor utilizado baseia-se na medição por infravermelhos, com uma precisão de ±4% e uma gama de medição de 0 a 10.000 ppm. O sinal de saída do sensor varia em resposta a alterações nos níveis de CO₂ detectados no ambiente. Para obter um valor digital de CO₂, é necessário implementar a seguinte fórmula que converterá o sinal analógico do sensor numa leitura exacta da concentração de CO₂ em partes por milhão (ppm).

$$C_{ppm} = 2000 * \frac{T_H - 2ms}{T_H + T_L - 4ms} \quad (4)$$

Onde:

C_{ppm} : a concentração de CO₂ é calculada, a unidade é ppm.

T_H : é altura de atingir um nível elevado durante um ciclo de produção.

T_L : é o tempo de um nível baixo durante um ciclo de saída.

A.4) Sensor de abertura de porta

Para la parte de desinfección, fue necesario implementar un método capaz de detectar cuándo la puerta de la cámara de desinfección está cerrada o abierta, con el fin de tomar las medidas de seguridad adecuadas y evitar exposiciones directas a la luz UV. En este caso, se emplearon dos interruptores de fin de carrera en la estructura de la cámara, que permiten, al cerrarse la puerta, mantenerse pulsados y así permitir que el proceso del sistema de control continúe.

A.5) Sensor de nivel de agua

Para detetar o nível de água no reservatório responsável pela geração de humidade, foi utilizado um sensor de nível de água que funciona através de um flutuador. Essa boia se movimenta de acordo com o nível de água no tanque ou reservatório, ativando ou desativando um interruptor mecânico ou magnético, dependendo do modelo.

A.6) Resistência

Para aquecer um compartimento por transferência de calor por condução, é utilizada uma resistência eléctrica que, quando aquecida, transfere calor para a superfície em contacto directo com ela, como o material de base ou o revestimento. O calor espalha-se da resistência para o material por condução, uma vez que as moléculas do material absorvem a energia térmica e dissipam-na para outras áreas do armário.

Estes aquecedores são geralmente fabricados de acordo com a potência necessária para atingir a temperatura desejada. A potência necessária para aquecer a divisão é então calculada utilizando a equação básica para a transferência de calor por convecção:

$$P = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

Onde:

h= Valor conservador

A= Área do espaço a aquecer

ΔT = Variação de temperatura em graus Celsius

A.7) Piezoeléctrico

Os atomizadores piezoeléctricos funcionam através da aplicação de uma corrente eléctrica alternada a um transdutor piezoeléctrico, o que faz com que o transdutor vibre a frequências ultra-sónicas.

A vibração gerada pelo transdutor é transferida para um líquido, normalmente água, que é decomposto numa fina névoa de gotículas minúsculas. Estas vibrações ultra-sónicas são capazes de quebrar as moléculas do líquido em gotículas microscópicas, gerando uma névoa que se dispersa no ar.

A.8) Válvula solenoide

As válvulas são dispositivos essenciais que controlam a passagem e o fecho de fluxos de ar, gás, óleo ou água, respondendo a impulsos eléctricos que abrem ou fecham o mecanismo. Para a seleção destas electroválvulas, é essencial que funcionem no modo “normalmente fechado” (NF), o que significa que a bobina não deve ser energizada para iniciar o fecho da válvula. Esta conceção garante que, em caso de falha de energia, a válvula fecha completamente, o que aumenta a segurança e a fiabilidade do sistema, impedindo a passagem descontrolada de gases.

A.9) Lâmpada UV-C

As lâmpadas UV-C ou germicidas UV-C pertencem à categoria de energia mais elevada da luz ultravioleta. Ao contrário de outros tipos de radiação ultravioleta, a luz UV-C é completamente absorvida pela camada de ozono e pela atmosfera, tornando-a inacessível à maioria dos seres vivos à superfície da terra. A sua gama de comprimentos de onda varia entre 280 e 200 nm, o que a torna uma ferramenta altamente eficaz para a desinfeção.

Para a desinfeção da câmara principal e da câmara de desinfeção, foram utilizadas lâmpadas fluorescentes de 8W da General Lighting, que funcionam com uma ligação de 220VAC.

B. Sistemas de controlo

Um dos pontos mais importantes na conceção do sistema é a seleção do microcontrolador que irá executar todo o programa do circuito de controlo. Para este efeito, foi escolhido o

microcontrolador ESP32, uma vez que será responsável pela execução das funções lógicas do sistema de controlo. Além disso, foi tido em conta que a interface de visualização para o utilizador deve fornecer as informações necessárias para o bom funcionamento do sistema. De acordo com o equipamento de referência utilizado neste projeto, foi escolhido um computador simples para servir de servidor, especificamente um Raspberry Pi 4 com 4 GB de RAM.

Para a receção dos sensores e ativação dos actuadores, foi desenvolvida uma placa PCB, como mostra a figura 2, de modo a garantir que todas as ligações são seguras e estáveis.

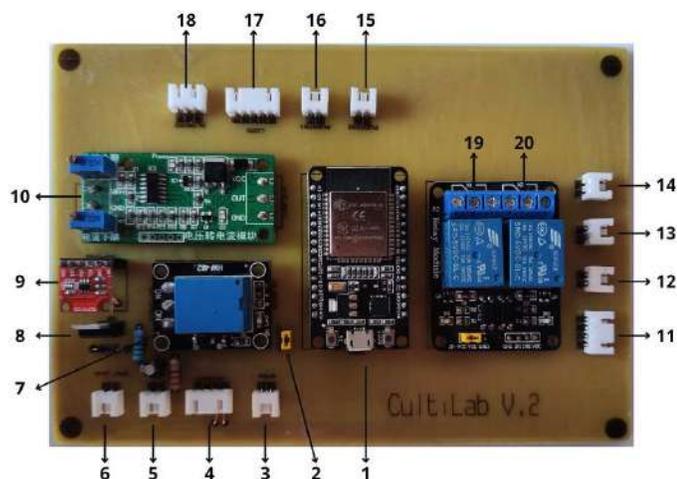


Fig. 2. Placa principal sistema de controlo.

A Figura 2 mostra diferentes componentes que são essenciais para o bom desenvolvimento do projeto.

- 1) Microcontrolador ESP32.
- 2) Jumper de alimentação do ESP32.
- 3) Sensor nível de água.
- 4) Sensor de humidade e CO₂.
- 5) Sensor de temperatura PT100.
- 6) Ventilador do sistema de humedificação.
- 7) Relé conversor de tensão para corrente.
- 8) Controlo do sistema de humedificação.
- 9) Conversor analógico-digital.
- 10) Conversor tensão-corrente.
- 11) Fonte de alimentação DC.
- 12) Saída de controlo da resistência.
- 13) Saída de controlo piezoelétrico.
- 14) Saída de controlo da válvula solenoide.
- 15) Sensor de abertura da porta.
- 16) Sensor de abertura da porta.
- 17) Leds indicadores de estado.

18) Sistema de alarme.

19) Relé da câmara de desinfecção das lâmpadas UV-C.

20) Relé para as lâmpadas UV-C na cabina principal.

C. Conceção da estrutura

Para este tipo de equipamento que permite o cultivo de amostras biológicas, onde é fundamental manter a assepsia, foi utilizado aço inoxidável com espessura de 1 mm para garantir maior firmeza. Este material foi selecionado para a câmara de cultura, pois apresenta excelentes propriedades que favorecem a assepsia durante o processo. Entre as propriedades mais destacadas do aço inoxidável está a sua resistência à corrosão, à oxidação, às altas temperaturas e à humidade, o que o torna um material ideal para ambientes controlados. Além disso, o seu ponto de fusão é de aproximadamente 1.500 °C, o que o torna adequado para o controlo térmico.

A estrutura externa do armário, como mostra a figura 3, foi feita em aço para garantir firmeza e resistência. Esta parte foi soldada em algumas secções, e noutras foi unida com parafusos, o que facilita a desmontagem e o acesso ao sistema elétrico interno. Por fim, a parte frontal do equipamento possui uma secção em acrílico que permite ao utilizador observar a cultura sem ter de abrir o armário. Possui ainda duas perfurações equipadas com luvas, permitindo o manuseamento de amostras sem as retirar do armário e sem comprometer a assepsia, evitando assim a contaminação durante o processo de cultivo.



Fig. 3. Vista frontal de equipo.

Os sensores críticos, como o sensor de temperatura e humidade, foram estrategicamente colocados no interior do equipamento, garantindo medições precisas do ambiente circundante. Esta disposição garante que as leituras ambientais não são alteradas pelas condições internas da câmara.

D. Software de monitorização

O software do sistema é uma plataforma interactiva baseada na Web, como se mostra na figura 4, que permite aos utilizadores gerir, monitorizar e controlar o processo de cultivo numa câmara estéril automatizada. Através de uma interface de fácil utilização, os utilizadores podem iniciar ciclos, ajustar parâmetros, visualizar dados em tempo real e gerar relatórios, tudo isto com funções específicas que garantem um acesso

controlado de acordo com as responsabilidades de cada utilizador.



Fig. 4. Menú de inicio.

As funcionalidades e as responsabilidades de cada função são descritas em seguida.:

- **Operador:**

Início do ciclo: Depois de introduzir as suas credenciais, o operador tem acesso à interface de início do ciclo (figura 5), onde pode introduzir os parâmetros máximos da cultura e iniciar o processo.



Fig. 5. Ventana inicio de ciclo.

Monitorização: Uma vez iniciado o ciclo, o operador é reencaminhado para o ecrã de monitorização, onde pode visualizar os valores dos sensores em tempo real. Tem também a possibilidade de fazer uma pausa no ciclo ou forçá-lo a terminar, se necessário.

- **Administrador:**

Início do ciclo e monitorização: O administrador tem acesso às mesmas interfaces de início de ciclo e de monitorização que o operador, podendo executar as mesmas funções.

Registo do operador: Ao contrário do operador, o administrador tem acesso ao registo de novos operadores. Além disso, pode procurar, modificar e apagar perfis de utilizadores no sistema.

Relatórios: O administrador pode consultar os relatórios gerados pelo sistema (figura 6), que detalham a evolução dos

ciclos de cultura e permitem uma análise mais profunda dos processos efectuados.



Fig. 6. Interfaz de reportes.

- **Manutenção:**

Acesso total: O pessoal de manutenção tem acesso total a todas as interfaces, incluindo o arranque do ciclo, a monitorização, o registo do operador e os relatórios. Esta função tem controlo total sobre o sistema.

Manutenção manual: Para além das funções acima referidas, o pessoal de manutenção tem a capacidade de ativar manualmente os actuadores para monitorizar o seu estado. Isto é útil para tarefas de diagnóstico e verificação da funcionalidade do equipamento. Pode também registar a data e a hora de cada intervenção de manutenção, o que facilita a análise dos tempos e necessidades de manutenção preventiva.

III. RESULTADOS

O sistema de aquisição de dados foi concebido para obter medições precisas dos sensores que controlam os parâmetros-chave. Foram utilizadas definições padrão para a temperatura, humidade e CO₂, com uma margem de erro aceitável de $\pm 1^\circ\text{C}$ devido às características do sistema de transferência de calor. O sistema atuador, que inclui um elemento de aquecimento, humidificador e válvula solenoide, ajustou os parâmetros de acordo com as necessidades específicas da cultura, assegurando que as condições eram adequadas para cada amostra biológica.

Em particular, foram efectuados 20 testes de desinfeção utilizando tiras químicas sensíveis à luz UV-C. As tiras mudaram de cor progressivamente quando expostas à luz UV-C, atingindo uma tonalidade verde escura após 5 minutos de exposição. Este tempo foi estabelecido como o tempo ótimo para assegurar a desinfeção completa do ambiente no interior do armário.

Além disso, observou-se que o sistema de controlo do armário é capaz de ajustar e manter a temperatura dentro dos intervalos definidos sem flutuações significativas. Graças à utilização de materiais adequados, como o aço inoxidável, que proporcionam uma elevada resistência térmica e durabilidade, conseguiu-se uma distribuição homogênea das condições no interior do armário. Isto assegura que as amostras recebem um ambiente

uniformemente controlado, garantindo uma temperatura constante e uniforme em todo o ambiente.



Fig. 7. Reporte de pruebas.

Em termos de custo, a conceção e implementação desta cabine estéril automatizada resultou numa redução significativa em relação a equipamentos similares disponíveis no mercado. Embora existam outros equipamentos que desempenham funções semelhantes, esta cabina distingue-se por ter tecnologias acessíveis e peças disponíveis no mercado, o que facilita a manutenção e a reparação sem comprometer a eficiência. Isto representa uma vantagem adicional ao oferecer uma solução económica sem sacrificar a qualidade e funcionalidade necessárias para o cultivo de amostras biológicas.

IV. CONCLUSÃO

Em conclusão, o projeto revela-se uma inovação tecnológica significativa para os laboratórios de biotecnologia. A cabine estéril automatizada não só melhora as capacidades de investigação e controlo de amostras biológicas, como também representa um passo em frente na automatização e melhoria da qualidade das culturas biotecnológicas. Este equipamento tem o potencial de ter um impacto positivo na ciência, acelerando os processos de investigação e contribuindo para o desenvolvimento de novas aplicações biotecnológicas. A implementação desta tecnologia marca um passo importante para o reforço da infraestrutura científica da universidade e abre novas possibilidades para a investigação biotecnológica.

Para garantir um desempenho ótimo da cabina estéril automatizada, é essencial estabelecer um plano de monitorização com revisões técnicas periódicas e os ajustes necessários. Recomenda-se também a implementação de um protocolo de manutenção preventiva que inclua a calibração dos sensores, a inspeção dos componentes e tarefas de manutenção para evitar falhas e prolongar a vida útil do sistema. A incorporação de tecnologias avançadas e de sensores mais robustos melhorará a eficiência e a durabilidade do sistema. Além disso, a formação do pessoal na utilização do equipamento e na interpretação dos dados otimizará o seu

impacto na investigação. Estas medidas garantirão a sustentabilidade e a melhoria contínua do gabinete, reforçando as capacidades do laboratório e a sua contribuição para a biotecnologia.

REFERÊNCIAS

- [1] Rodríguez, D., Acosta, C., Morlán, B., & Gómez, R. (2015). *Estación de incubación para el estudio del crecimiento bacteriano en muestras biológicas*. Revista Cubana de Ingeniería, 3. <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/350/pdf>
- [2] Stephanopoulos, G., Aristidou, A., & Nielsen, J. (1998). *Metabolic engineering: Principles and methodologies*. Academic Press. https://www.researchgate.net/publication/281749692_Metabolic_Engineering
- [3] Demian, L., & Adrio, L. (2008). Contributions of microorganisms to industrial biology. *Molecular Biotechnology*, 38(1), 41-55. <https://doi.org/10.1007/s12033-007-0035-z>
- [4] Villamil, E. (2005). *Manual de mantenimiento para equipos de laboratorio*. Organización Panamericana de la Salud.
- [5] Herrera, J., Mercedes, L., & Vásquez, V. (2018). Modification of a domestic electric oven to a controlled laboratory incubator with Arduino. *Agroindustrial Science*, 8(1), 57-66. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2018.01.09>

AUTORES



Rocío Isabel Miranda Zamora estudante de Engenharia Biomédica e estudante de Engenharia de Telecomunicações na Universidad Privada del Valle UNIVALLE.

Biofilme da pele de Tilápia (*Oreochromis niloticus*) para o tratamento de queimaduras

Mikaela Pantoja Rocabado, Erika Fernández Terrazas
 Departamento de Engenharia Biomédica, Faculdade de
 Informática e Eletrônica, Universidade Privada del Valle –
 UNIVALLE, Cochabamba - Bolívia.
 prm0024087@est.univalle.edu, efernandezt@univalle.edu

Abstract—It is a concern in our society the search for new alternatives to multiple needs that arise as a result of burn accidents; which can lead to serious physical, psychological and emotional problems. In this way, insufficient alternatives were detected for those who present second and / or third-degree burns. The purpose of this research is to present new healing methods based on biomimetism or biomimetics. From the bibliographic review of scientific articles of international journals and information published by research institutions in the area, the state of knowledge of this area is contributed. As part of the results, the idea of implementing the Biofilm of tilapia skin in the healing process from an effective method for the regeneration of cells that were damaged due to burns is disclosed. We can conclude that from this revolutionary method the needs of the patients can be supplied by providing an appropriate healing technique with beneficial results and in an almost complete way.

Index Terms—Biofilm of tilapia skin, biomimetics, burns, cell regeneration.

Resumo—É uma preocupação em nossa sociedade a busca por novas alternativas para atender às múltiplas necessidades que surgem devido a acidentes com queimaduras, os quais podem acarretar sérios problemas físicos, psicológicos e emocionais. Dessa forma, identificou-se a insuficiência de alternativas para pessoas que apresentam queimaduras de segundo e/ou terceiro grau. O objetivo deste trabalho de pesquisa é apresentar novos métodos de cura baseados no biomimetismo. A partir da revisão bibliográfica de artigos científicos publicados em revistas internacionais e de informações disponibilizadas por instituições de pesquisa da área, contribui-se para o estado do conhecimento neste campo. Como parte dos resultados, destaca-se a proposta de implementação do biofilme da pele de tilápia no processo de cicatrização, utilizando um método eficaz para a regeneração das células danificadas por queimaduras. Conclui-se que, por meio desse método inovador, é possível suprir as necessidades dos pacientes, oferecendo uma técnica de cura apropriada, com resultados eficazes e praticamente completos.

Palavras chave—Biofilme de pele de tilápia, biomimetismo, queimaduras, regeneração celular

I. INTRODUÇÃO

Os biomateriais são componentes de origem natural ou sintética, empregados nos processos de reparação, restauração ou até mesmo substituição de tecidos ou órgãos humanos que sofreram danos consideráveis por diversas causas (Sastre et al., 2004, citado em Zamora-Mora et al.,

2010; Vallet, 2006).

Entende-se por biofilme uma estrutura coletiva de microrganismos que se adere a superfícies vivas ou inertes e é revestida por uma camada protetora segregada pelos próprios microrganismos.

A tilápia (*Oreochromis niloticus*) é um peixe africano que pode viver em água doce ou salgada (www.fao.org), cuja pele funciona como uma barreira que evita a contaminação e a perda de líquidos, pois contém colágeno tipo I, semelhante ao da pele humana, apresentando resistência à tração. Isso significa que não se rompe quando tensionada, devido à sua boa umidade.

Diante da necessidade das pessoas que apresentam queimaduras de segundo e/ou terceiro grau, buscaram-se métodos alternativos para a cicatrização das lesões, o que levou ao surgimento da ideia de implementar o biofilme da pele de tilápia no processo de cura.

A observação parte de pacientes que apresentam queimaduras de segundo e/ou terceiro grau.

Busca-se obter uma cicatrização rápida, eficaz e estética, pois o tratamento tradicional implica um gasto adicional com insumos médicos, além do rigoroso processo de limpeza e troca de curativos na lesão, do risco de infecções e, não menos importante, do comprometimento estético da região afetada.

Após observar o pouco conhecimento da população sobre o tratamento com biofilme da pele de tilápia para esse tipo de lesão, considera-se conveniente propor a implementação e o uso desse método nos hospitais da Bolívia. Este estudo baseia-se em uma pesquisa bibliográfica, enquadrada na área de biomimética ou biomimetismo, considerando a natureza como uma fonte de inspiração para resolver problemas dos seres humanos.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho é baseado em uma revisão bibliográfica que, no futuro, será testada na Bolívia, a partir de uma fase experimental e de campo. A pesquisa foi fundamentada na revisão bibliográfica de artigos científicos de revistas internacionais, como a Revista Ibero-Americana de Polímeros (Zamora-Mora et al., 2010), Revista da Faculdade

de Engenharia (Muñiz, 2017), relatórios científicos e outras fontes baseadas em resultados de pesquisas, como BBC Mundo, ABC Sociedade e Cadena SER, além de informações publicadas por instituições de pesquisa da área, contribuindo para o estado do conhecimento nesta área.

III. RESULTADOS

Em primeiro lugar, será implementada a observação, pois é necessário determinar as condições de cada um dos pacientes nos quais o tratamento será implementado.

Após realizar as análises necessárias no paciente, de acordo com a gravidade da lesão,

No próximo passo, será realizada a implementação do biofilme, que ajudará a:

- Cobrir a lesão para evitar infecções.
- Reduzir a quantidade de insumos médicos, diminuindo o custo.
- Hidratar a área da lesão para evitar uma cicatrização inadequada e formação de queloides.
- Fornecer colágeno para a regeneração da pele do paciente.

O monitoramento será realizado pelo pessoal médico especializado na área de queimados do hospital designado ao paciente, que:

- Avaliará a evolução da lesão.
- Verificará qualquer reação adversa ou sintomas secundários.
- Fará a troca do biofilme no tempo requerido.
- Realizará a limpeza e cicatrização da lesão.

A. Queimaduras

Uma queimadura é uma lesão nos tecidos do corpo causada pelo calor, substâncias químicas, eletricidade, sol ou radiação. As escaldaduras por líquidos quentes e vapor, os incêndios em edifícios e os líquidos e gases inflamáveis são as causas mais comuns de queimaduras. Outro tipo de queimadura é a causada pela inalação de fumaça ou partículas tóxicas.

Trabalharemos com base em dois tipos de queimaduras:

- Queimaduras de segundo grau, que danificam a camada externa e a que está logo abaixo dela.
- Queimaduras de terceiro grau, que danificam ou destroem a camada mais profunda da pele e os tecidos abaixo dela.

As queimaduras podem causar inchaço, bolhas, cicatrizes e, nos casos mais severos, choque e até morte. Também podem levar a infecções, pois danificam a barreira protetora da pele. O tratamento das queimaduras depende da causa, da profundidade e da extensão da área do corpo afetada. ("Queimaduras," s.d.)

A biotecnologia encontra soluções ótimas para os problemas de saúde das pessoas, e uma dessas soluções é a que apresentamos aqui: o Biofilme de pele de tilápia

(*Oreochromis niloticus*) para o tratamento de queimaduras.

Diante da falta de recursos e das limitações burocráticas para tratar queimaduras em hospitais públicos, uma equipe de médicos brasileiros se uniu em uma pesquisa pioneira no mundo. Pela primeira vez, a pele de um animal aquático, a tilápia do Nilo, está sendo usada para tratar e curar queimaduras graves. Este grupo de cientistas pode anunciar, em julho deste mês, os resultados de novas experiências que podem transformar esse peixe em uma solução para uma série de tratamentos, nos quais nunca se usou pele animal antes.

"Já usamos em todos os tipos de queimaduras, mas estamos utilizando esse método em outras áreas, como a ginecológica. Realizamos tratamentos com sucesso em casos de mulheres que nasceram sem vagina e descobrimos que podemos usar a pele em inúmeras áreas" (declaração ao ABC pelo cirurgião plástico Edmar Maciel, diretor do Instituto de Apoio ao Queimado de Fortaleza (IAQ), no estado do Ceará, ao norte do Brasil).

B. Boa umidade

As descobertas dessa equipe, no entanto, colocaram o Brasil na vanguarda mundial neste tipo de cura heteróloga, com pele animal. "A pele de tilápia é superior à do porco ou da rã, porque contém colágeno tipo 1, semelhante ao da pele humana, resistência à tração, o que significa que não se rompe quando tensionada, e boa umidade. Esses são os três fatores mais importantes para uma boa cicatrização da pele", conta o cirurgião.

As pesquisas começaram há três anos e os tratamentos, há um ano, período em que já foram atendidos 60 pacientes com queimaduras de segundo grau. Na última etapa das pesquisas, que começam agora, serão atendidos 120 adultos e 30 crianças.

Segundo o médico, os pacientes se preocupavam no início e tinham muitas dúvidas sobre o cheiro e se a pele escamada ficaria para sempre, mas no final, ficavam muito satisfeitos com os resultados. "A pele funciona como um tampão, evitando a contaminação e a perda de líquidos. Não precisa ser trocada diariamente, como ocorre com os curativos, e além disso, reduz a dor, o tempo de tratamento e os custos" ("A pele de tilápia, o novo remédio para queimaduras", s.d.).

Já foram empregados outros procedimentos, como a pele de porco congelada ou o tecido humano, para promover a proteína da cicatrização em queimaduras. A escassez desses materiais nos hospitais do Brasil os obrigou a testar novos métodos ("Pele de tilápia para tratar queimaduras graves | Ciência e tecnologia | Cadena SER", s.d.).

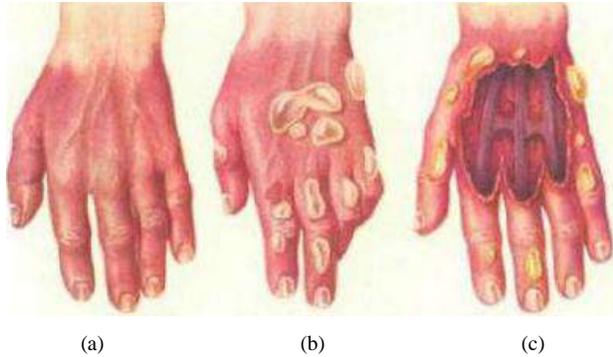


Fig. 1: Lesões nos tecidos das mãos causadas por exposição ao calor. (a) Queimadura de primeiro grau, dano apenas na camada externa da pele. (b) Queimaduras de segundo grau, dano na camada externa e na camada abaixo dela. (c) Queimaduras de terceiro grau, danificam ou destroem a camada mais profunda da pele e os tecidos abaixo dela. (Tipos de queimaduras. (s.d.). Recuperado em 4 de junho de 2018).



Fig. 2: Lesões nos tecidos dos braços causadas por exposição ao calor tratadas com pele de tilápia. (Pele de tilápia para tratar queimaduras graves | Ciência e tecnologia | Cadena SER. (s.d.). Recuperado em 4 de junho de 2018).



Fig. 3: Lesões nos tecidos das pernas causadas por exposição ao calor tratadas com pele de tilápia. (Pele de tilápia para tratar queimaduras graves | Ciência e tecnologia | Cadena SER. (s.d.). Recuperado em 4 de junho de 2018).

Baseamo-nos nos resultados obtidos pelos pesquisadores de nacionalidade brasileira para iniciar esse método na Bolívia e, assim, somar nossos pacientes aos resultados satisfatórios dessa implementação. As pesquisas começaram há três anos e os tratamentos há um ano, período no qual já foram atendidos 60 pacientes com queimaduras de segundo grau. Na última etapa das pesquisas, que se inicia agora, serão atendidos 120 adultos e 30 crianças. (Pele de tilápia para tratar queimaduras graves | Ciência e tecnologia | Cadena SER. (n.d.). Recuperado em 4 de junho de 2018).

Segundo o médico, no início os pacientes ficavam preocupados e tinham muitas dúvidas sobre o odor e se a pele escamada permaneceria para sempre, mas, no final, ficavam muito satisfeitos com os resultados. "A pele funciona como um tampão, evitando a contaminação e a perda de líquidos. Não precisa ser trocada diariamente, como ocorre com curativos, e ainda reduz a dor, o tempo de tratamento e os custos." Afirmam que o tratamento é menos doloroso do que o uso de cremes e curativos.

*A pesquisa, premiada no Brasil pelo Congresso Brasileiro de Cirurgia Plástica e pelo Congresso Brasileiro de Queimaduras, contou com a participação de 46 pesquisadores. Entre eles, os doutores Marcelo Borges, Odorico Moraes, Nelson Piccolo e as doutoras Elisabete Moraes, Tereza Bandeira, Ana Paula Negreiros, Andréa Pontes e Mônica Mathor. As instituições envolvidas são: o Instituto de Apoio ao Queimado, a Universidade Federal do Ceará (UFC), o Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Medicamentos (NPDM), o Instituto José Frota e a empresa Enel, que financiou a pesquisa. ("A pele de tilápia, o novo remédio para queimaduras," n.d.).

No âmbito da pesquisa, ao se comprovarem os excelentes resultados do uso do Biofilme como biomaterial natural, alguns países latino-americanos, como o Brasil, iniciaram a implementação de protocolos para o funcionamento de bancos de pele animal (Philopimin, 2018).

IV. DISCUSSÃO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um método que representa um avanço na implementação de novos métodos de cicatrização baseados em biomimética, que mostram ferramentas ou soluções inspiradas na natureza. A natureza, de forma contínua, realiza experimentos onde se evidencia a presença de elementos distintivos próprios da ciência dos materiais, entre outros (Muñiz 2017). Um exemplo nesta área é o uso de Biofilme de pele de Tilápia (*Oreochromis niloticus*). Embora esse método possa ser utilizado em outras áreas da medicina, o objetivo é utilizá-lo para melhorar a recuperação e reabilitação desses pacientes, apoiando a iniciativa tomada pelos cientistas do Brasil para expandir esse conhecimento para outras regiões, como a Bolívia.

Em outras pesquisas, a pele de Tilápia foi combinada com

outros biomateriais, como o quitosano de camarão, para gerar maior eficácia nos resultados (Alvarenga e Rojas, 2011). O ideal seria começar com o método apresentado no artigo, para assim avançar com a base já estabelecida.

V. CONCLUSÃO

Foi apresentada uma pesquisa que permite implementar um método alternativo baseado no tratamento de queimaduras, o Biofilme de pele de Tilápia (*Oreochromis niloticus*), que demonstrou ser um tratamento eficaz e com múltiplos benefícios para os pacientes que apresentam essas lesões. Em conclusão, a pesquisa apresentou resultados potencialmente favoráveis diante da falta de recursos e das limitações burocráticas para tratar queimaduras em hospitais públicos, através da alternativa do Biofilme de pele de Tilápia (*Oreochromis niloticus*). Em relação a tudo o que foi mencionado neste trabalho, recomenda-se levar esta interessante e inovadora alternativa para a fase experimental.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos à equipe médica/científica do Brasil por serem pioneiros nesta pesquisa, que serve de base para continuar com o avanço no campo da Biotecnologia.

Agradecemos à Lic. MSc. Erika Fernández Terrazas, docente da UNIVALLE COCHABAMBA-Bolívia, por ser uma guia e mentora neste processo de revisão bibliográfica sobre a pesquisa.

Agradecemos à Universidade Privada do Valle por incentivar os estudantes a apresentar trabalhos de pesquisa.

Agradecemos à INATEL por proporcionar a oportunidade aos estudantes de fazerem parte deste processo de desenvolvimento na área de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Alvarenga, S. e Rojas, M. Elaboração de curativos biológicos de colágeno da derme de tilápia e de quitosano do exoesqueleto de camarão e avaliação preliminar de seu potencial terapêutico em afecções epidérmicas, 2011.
- [2] A pele de tilápia, o novo remédio para as queimaduras. (s.d.). Em 4 de junho de 2018, de http://www.abc.es/sociedad/abci-piel-tilapia-nuevo-remedio-para-quemaduras-201707232246_noticia.html
- [3] Muñiz, R. Rev. Tekhne. Vol. 20, Núm. 2: 023-038, 2017. ISSN 1316-3930.
- [4] Pele de tilápia para tratar queimaduras graves | Ciência e tecnologia | Cadena SER. (s.d.). Em 4 de junho de 2018, de http://cadenaser.com/ser/2017/05/26/ciencia/1495782903_230913.html
- [5] Philopimin, C., Maciel, E., De Morais, M., Maciel, M., Sales, M., Araújo, M., Silva, F., Borges, M. Elaboração de um protocolo para implementação e funcionamento do primeiro banco de pele animal do Brasil: Relato de experiência. Revista Brasileira de Queimaduras, 2018, 17(1:20-7 ISSN 1980-1883), de <http://www.rbqueimaduras.com.br/>
- [6] Queimaduras. (s.d.). Recuperado de <https://medlineplus.gov/spanish/burns.html>
- [7] Subespécies *Oreochromis niloticus niloticus* · Naturalista. (s.d.). Recuperado em 4 de junho de 2018, de <http://www.naturalista.mx/taxa/121323-Oreochromis-niloticus-niloticus>
- [8] Tipos de queimaduras. (s.d.). Recuperado em 4 de junho de 2018, de <http://medsaludin.es/tipos-de-quemaduras.html>
- [9] Vallet Regi, M. (2006). Biomateriais para substituição e restituição de tecidos. Relatório científico. Madrid, Espanha: Universidade de Complutense, 2006, de <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DIC10/zamora.pdf>
- [10] www.fao.org. Recuperado em 14 de dezembro de 2019
- [11] Zamora-Mora, V. M., Sibaja & J. Vega-Baudrit. 2010 Revista iberoamericana de polímeros, 11 (7, 607-619).

AUTORES



Autora Mikaela Pantoja Rocabado é estudante do curso de Engenharia Biomédica da Universidade Privada del Valle (UNIVALLE).



Tutora Lic. MSc. Erika Fernández Terrazas é docente do curso de Engenharia Biomédica da Universidade Privada del Valle (UNIVALLE) nas

disciplinas de biomateriais, biologia celular e molecular.

Tendências do Uso de Inteligência Artificial na Educação

Rafaella Bortolosso Mendes
Graduanda em Engenharia de Controle e Automação
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
Email: rafaella.bortolosso@gea.inatel.br

Abstract—A inteligência artificial (IA) tem sido amplamente aplicada na educação, proporcionando novas abordagens de ensino e aprendizado. Este artigo analisa as tendências atuais do uso de IA na educação, discutindo vantagens, desafios e implicações éticas.

Index Terms—Inteligência Artificial, Educação, Tendências, Ética.

I. INTRODUÇÃO

A inteligência artificial (IA) tem revolucionado diversos setores, incluindo a educação, onde novas ferramentas estão transformando o modo como ensinamos e aprendemos. Assistentes virtuais de IA, como os desenvolvidos pela OpenAI, destacam-se por suas capacidades de processamento de linguagem natural, permitindo interações sofisticadas e personalizadas com os usuários.

Com a popularização dos sistemas de IA generativa, torna-se crucial entender como essa tecnologia está sendo aplicada no contexto educacional. O objetivo deste artigo é mapear as tendências de uso, benefícios, desafios e implicações éticas dessa tecnologia.

II. VISÃO GERAL DOS SISTEMAS DE IA NA EDUCAÇÃO

Os sistemas de IA baseados em linguagem, desenvolvidos por plataformas como OpenAI, são ferramentas capazes de gerar respostas coerentes e contextualmente relevantes. Suas aplicações incluem fornecimento de feedback imediato, auxílio na escrita acadêmica, resposta a perguntas complexas e personalização do aprendizado.

A utilização da IA na educação ganhou destaque com a introdução de sistemas de tutoria inteligente e plataformas adaptativas. Esses sistemas visam melhorar a eficácia do ensino ao oferecer suporte personalizado e feedback em tempo real.

III. PERCEPÇÕES DOS ALUNOS SOBRE VANTAGENS E DESVANTAGENS

Os alunos identificam diversas vantagens no uso de assistentes virtuais de IA:

A. Vantagens

- **Acessibilidade e conveniência:** Disponibilidade 24/7 para responder dúvidas.
- **Economia de tempo:** Respostas rápidas e direcionadas.
- **Suporte interdisciplinar:** Assistência em diferentes áreas do conhecimento.

B. Desvantagens

- **Dependência excessiva:** Pode reduzir a criatividade e o pensamento crítico.
- **Falta de empatia:** Os sistemas não possuem interação emocional como educadores humanos.
- **Questões éticas:** Risco de plágio e privacidade dos dados dos alunos.

IV. O PAPEL DA ÉTICA NO USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA EDUCAÇÃO

A privacidade e segurança dos dados são preocupações centrais, pois os sistemas de IA coletam e analisam grandes volumes de informações pessoais. É essencial garantir transparência e explicabilidade nos algoritmos.

Além disso, a mitigação de vieses na IA é um aspecto crítico. Algoritmos podem reproduzir preconceitos existentes, sendo necessário o desenvolvimento de práticas para garantir decisões justas e imparciais.

V. O PAPEL DO SER HUMANO COMO ALIADO DA IA

Os assistentes virtuais de IA complementam o trabalho dos professores, automatizando tarefas repetitivas e permitindo que os educadores se concentrem em aspectos mais complexos do ensino.

Educadores interpretam e contextualizam as recomendações da IA, ajustando métodos de ensino e corrigindo possíveis erros nos algoritmos. Dessa forma, a colaboração entre humanos e IA é essencial para um ensino mais eficaz.

VI. POSSÍVEIS APLICAÇÕES DOS ASSISTENTES VIRTUAIS DE IA NA SALA DE AULA

Os assistentes virtuais podem ser usados de diversas formas, tais como:

- **Tutoria virtual personalizada:** IA como tutores interativos que fornecem feedback em tempo real.
- **Correção automática de conteúdos:** Avaliação de redações e testes automaticamente.
- **Gamificação e aprendizado adaptativo:** Quizzes e atividades interativas ajustadas ao nível do aluno.

VII. ESTUDOS DE CASO E EXEMPLOS PRÁTICOS

A. Ensino de Inglês para Fins Específicos (ESP)

Os assistentes virtuais foram integrados em cursos de inglês técnico, ajudando na correção de gramática e na prática da conversação.

B. Engenharia de Software

A IA foi utilizada para responder questões de engenharia de software, resolver bugs e gerar código.

C. Integração com Cursos Técnicos

Os assistentes de IA foram empregados em cursos técnicos para esclarecer dúvidas e oferecer suporte no aprendizado de termos especializados.

VIII. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A implementação da IA na educação enfrenta desafios como a necessidade de infraestrutura robusta, proteção de dados e treinamento de educadores para lidar com essa tecnologia.

Avanços tecnológicos poderão incluir algoritmos mais precisos e maior integração com plataformas educacionais, tornando o aprendizado mais interativo e eficaz.

IX. CONCLUSÃO

Os assistentes de IA apresentam grande potencial para a educação, mas sua adoção deve ser feita com cautela, garantindo privacidade, transparência e uma abordagem equilibrada entre tecnologia e ensino tradicional.

REFERENCES

- [1] A. Rind et al., "Determining the Impact of Artificial Intelligence on the Development of Higher Education," *IEEE ICETSI*, 2024.
- [2] J. Prentzas, M. Sidiropoulou, "Assessing the Use of OpenAI Chat-GPT in a University Department of Education," *IEEE IISA*, 2023.
- [3] O. L. Santos, D. Cury, "Using ChatGPT as a Virtual Peer for Peer Instruction in Computer Programming Education," *IEEE FIE*, 2023.
- [4] D. Kovačević, "Use of ChatGPT in ESP Teaching Process," *IEEE INFOTEH*, 2023.
- [5] M. Ninaus, M. Sailer, "Closing the Loop – The Human Role in AI for Education," *Frontiers in Psychology*, 2022.
- [6] A. Nguyen et al., "Ethical Principles for AI in Education," *Education and Information Technologies*, 2023.

Exploiting Vulnerabilities by Creating an Attack Tree (AT) for a Denial of Service (DoS) Attack

Cauã M. Borowczak^a, Enzo M. D'andrea^a, Anderson A. A. Silva^{abcde}, Adilson E. Guelfi^f,
^aFIAP, ^bIPT, ^cUNIP, ^dSENAC, ^eUSP, ^fUNOESTE

caua.b.professional@gmail.com, contato.enzomiziara@gmail.com, anderson@uol.com.br, guelfi@unoeste.br

Abstract—Denial of Service (DoS) cyberattacks against Internet services, especially web servers, are quite common. These attacks often use vulnerabilities that are exploited by attackers in Attack Trees (AT). An AT is the designation for a set of interconnected steps that will generate a cyberattack. In this paper, based on an academic challenge, an AT is assembled to exploit a vulnerability that leads to a DoS attack. The exploited flaw is related to the reuse of cookies in a target domain hosted by a large web provider and is relatively simple to replicate. The attack and results are detailed and solutions are proposed to mitigate the problem.

Index Terms—Denial of Service (DoS), Attack Tree (AT), Cookie Reuse, Web Server Vulnerabilities.

Resumo - Ataques cibernéticos do tipo Denial of Service (DoS) contra serviços na Internet, principalmente servidores web, são bastante comuns. Muitas vezes esses ataques se valem de vulnerabilidades que são exploradas por atacantes em Attack Trees (AT). Uma AT é a designação para um conjunto de etapas interligadas que vão gerar um ataque cibernético. Nesse paper, a partir de um desafio acadêmico, uma AT é montada para a exploração de uma vulnerabilidade que leva a um ataque do tipo DoS. A falha explorada é relacionada com o reuso de cookies em um domínio alvo hospedado em um grande provedor web e é relativamente simples de ser replicada. Além do detalhamento do ataque e dos resultados, soluções são propostas para mitigação do problema.

Palavras Chave - Denial of Service (DoS), Attack Tree (AT), Reuso de Cookies, Vulnerabilidades em Servidores Web.

I. INTRODUCTION

DENIAL OF SERVICE (DoS) attacks are among the oldest and most common attacks observed in the context of Information and Communication Technologies (ICT). In general, these attacks act against the availability of services, systems, networks, and events through examination of the resources of the targets by sending excessive requests - DoS - or that are coordinated in time - Low-rate DoS (LDoS). There are also so-called Distributed DoS (DDoS), where the requests come from different sources [1], [2]. Cloud computing environments and websites are potential targets of these attacks, in which execution methods often vary greatly [3].

However, despite being quite widespread, many DoS attacks require sophisticated planning, as they depend on the exploitation of vulnerabilities or specific conditions in each environment [4], [5]. The work of [6], for example, categorizes vulnerability exploitation within the first level of techniques used in DoS attacks.

In fact, detection and defense strategies vary greatly. Artificial Intelligence (AI) algorithms are among the options present in the literature: neural networks are used by [1], [7], cluster algorithms by [8], and Recurrent Neural Networks (RNN) are adopted by [9]. It is worth noting that simply blocking the packets can be extremely complicated, as attackers use various stealth and spoofing techniques, making identification difficult [8]. Thus, understanding how the packet flow reaches the victim is also important and examples from the literature reinforce this, such as the work of [10] which uses Feature Select (FS) to analyze attacks, [11] that identifies patterns in burst flows using Exponential Weighted Moving Averages (EWMA), [12] which addresses the problem in Industrial Control Systems (ICS), and [13] which dynamically selects transmission channels and employs minimax control strategies.

It is important to note that many vulnerabilities require a series of initial actions or steps to be fully exploited. These primary actions, called preparatory attacks or Attack Trees (AT), are a set of steps that seem harmless in isolation, but are part of more sophisticated attacks [6], [14] - and often take advantage of system vulnerabilities. Since some individual actions that make up an AT are subtle and may not be detected by security controls, automation of complex attacks occurs, which can be difficult to analyze, understand, and detect [15], [16], [17]. This is precisely why papers that show and explain in detail the development of AT in cyberattacks are rare.

Contrary to common sense, which may lead one to believe that AT analysis and understanding only serve to help attackers exploit gaps in vulnerable systems, studying how simple steps can compose a complex attack aids in the creation of more proactive and sophisticated security controls [18], [16]. Didactic descriptions of the steps that make up an AT are also useful for developing security controls and raising user awareness. Given the above, we found a lack of works that describe in detail how preparatory attacks in an AT can lead to more sophisticated attacks and how these attacks can be mitigated.

Thus, the objective of the current paper is to conduct a study on the exploitation of an AT for a DoS attack on a web server, with a detailed description of a practical case of exploitation and mitigation of the attack.

In addition to the INTRODUCTION (section I), this paper has a RELATED WORKS (section II) which discusses some related works that serve as the basis for our proposal, while the section EXPLOITATION AND MITIGATION OF A DOS VULNERABILITY (section III) presents a case study of

exploitation of a DoS attack from an AT. The DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL ENVIRONMENT (section IV) discusses the experiment environment, the results obtained, and mitigation of attack. Finally, the CONCLUSION (section V) presents the final conclusions and limitations about the paper.

II. RELATED WORKS

This section discusses some important research on preparatory attacks on cyber systems and discusses the main works that deal with the topic.

Attacks against system availability can occur in a wide range of scenarios and environments. While the work of [1] develops detection schemes in Software Defined Networks (SDN), the paper by [3] focuses on solving attacks targeting cloud environments. Other examples, such as the work of [6], deal with the consequences of DoS attacks on power grids, while research conducted by [19] and [20] seek to solve attacks in Internet of Things (IoT) environments.

Just like the diversity of scenarios, the proposed solutions are also comprehensive. Proposals involving analyses based on machine learning algorithms have been used over time, such as the work of [4], [21], [10] and [9]. Examples of prevention against attacks LDoS [22], [23] and identification of disguised DoS attacks [5], [24] can also be found in the literature.

In many cases, it is possible to verify that attacks are only consolidated from AT with preparatory actions. Among the examples is the work of [2], which proposes the protection of a sensor network subject to a DoS attack. The attack in question can be understood as a short-term AT. Basically, the authors gain access to a sensor and from there launch a DoS attack against the network, demonstrating how many attacks of this type require preparatory malicious actions. Within the same context, more elaborate AT used in DoS attacks can be seen in the works of [15], [17], [16] and [18].

However, few studies provide detailed descriptions of the step-by-step process of attacks. Furthermore, few studies provide the explanations and/or solutions so that they can be studied and replicated for educational purposes. The proposal for the current paper originates from penetration tests and authorized experiments carried out by students on an undergraduate cybersecurity course.

III. EXPLORATION AND MITIGATION OF A DOS VULNERABILITY

This section presents the proposal of the current paper. The central idea is the creation of an AT that exploits some vulnerabilities in a target domain (website) of a large provider. As stated, the entire process is authorized within the context of an authorized penetration test and there was no malicious intent in the attack performed. However, it is important to emphasize that the testing environment is public and contains all the usual security controls and safeguards in this type of environment has. A small application developed and made available in Python is used to automate the attack and exploit the vulnerabilities. Figure 1 shows the main screen of this application.

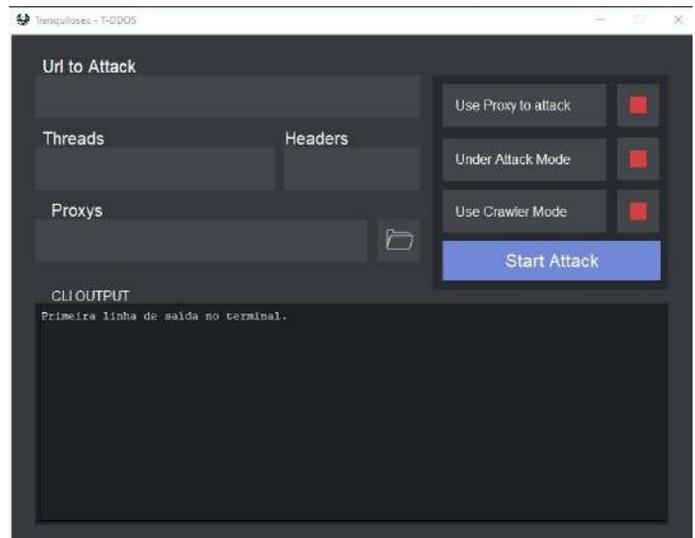


Fig. 1. Screenshot of the application used for the attack.

The screen illustrated in Figure 1 contains manual options that can be used in the attack, such as the main URL of the target domain, the maximum number of threads supported in the attacker's environment that can be used against the target domain, the minimum number of Headers that are generated in the attack, a list (file) with proxies, and three options used during the attack: (1) Use Proxy to Attack, which enables the creation of a list of proxies that make it difficult to detect the origins of the attack; (2) Under Attack Mode, which enables the capture of authenticated cookies created when executing Completely Automated Public Turing Test to tell Computers and Humans Apart (CAPTCHA) generated by the target domain; and (3) Use Crawler Mode, which searches for the most resource intensive endpoints in the target domain to amplify the attack action.

Further on it can be seen that the vulnerability in this paper is exploited through the use of CAPTCHA, so it is important to highlight what this security feature used on some websites is. CAPTCHA is a tool used to check whether an access is being made by a human or by an automated malicious script (bot). This verification is performed using a small challenge in text, audio, or video, offered to the user attempting to access. The assumption is that the resolution of the challenge can identify whether or not the user is human [25].

The application also has a button to start the attack and a shell terminal to show the commands executed. Figure 2 illustrates details of the AT and DoS attack against a target domain allocated to a public IP at a large provider.

The AT illustrated in Figure 2 is divided into three main modules: (1) Preparation Module; (2) Collection Module; and (3) Attack Module. Each module is made up of specific operations (functions) that make up the AT. The Preparation Module contains scripts that prepare the local environment for the attack. The Collection Module consists of scripts that collect information directly from the target domain to exploit vulnerabilities. Finally, the Attack Module generates the malicious requests that execute the attack. The three

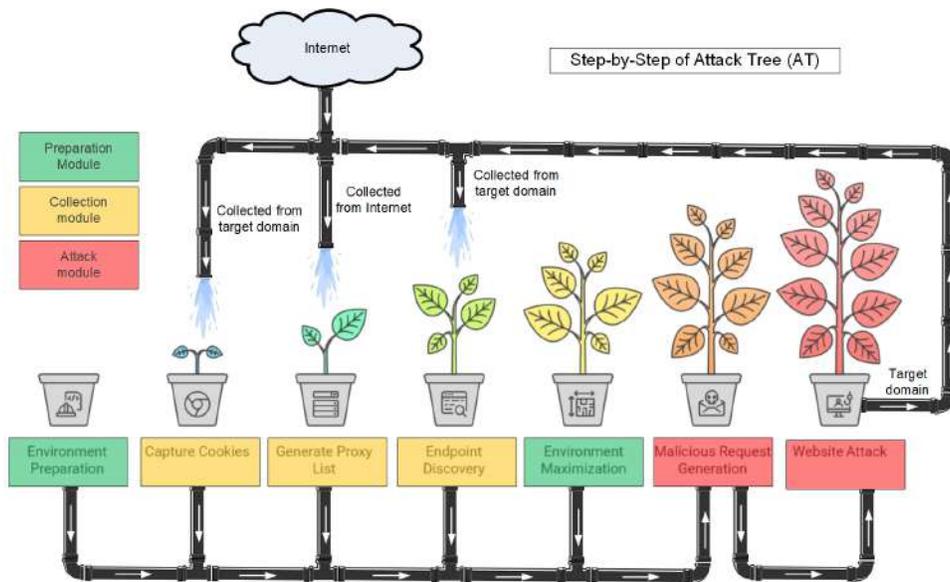


Fig. 2. Attack Tree (AT) of DoS Attack.

modules and the operations contained in each of them are detailed in the subsequent subsections.

A. Preparation Module

The first operation performed within the Preparation Module is Environment-Preparation. This is a simple script to check whether certain local resources (files and directories) required for the attack to function properly are present in a given folder (by default, resources). If they do not exist, the script creates the missing directories or files in the local attack environment. This ensures that the execution environment is adequately prepared before the DoS attack begins.

The Environment-Maximization operation checks how many CPU cores there are in the local attack environment, generating the maximum possible number of simultaneous processes, which maximizes the speed and number of requests sent to the target domain. At the same time, the multithreaded resources of the local environment are also checked and explored, which serves to maximize the number of threads and, consequently, the attack.

B. Collection Module

Some web servers, such as those explored in the current article, have an intermediary security service between the user and the target domain to ensure security and performance. The function of this mechanism is to prevent requests from reaching the server directly if they are considered potentially dangerous, fraudulent, or excessive. By default, excessive requests sent from the same origin in a short period of time are blocked. Typically, the target domain is based on the originating IP and User-Agent used in the requests. The User-Agent is a parameter passed in requests to a web server, which provides information related to the client's device, browser, and operating system and serves to adapt the page for display [26]. In general, the use of different source IPs and User-Agents in requests tends to make this protection difficult.

Some websites hosted on the target provider also have a security feature that enables the generation of a CAPTCHA. When the CAPTCHA is active on a website, user interaction is inevitably required to authenticate the request to the target domain. When completed, the CAPTCHA generates a cookie, based on data from the User-Agent and the external public IP used, which is passed in a request with the cookie attribute `cf_clearance`. The vulnerability of this operation is that this cookie allows new requests to the target domain, as long as they are made from the same public IP and User-Agent with which the CAPTCHA was performed. In other words, storing the cookie allows new requests (from the same IP) to be made to the target domain and to pass directly through the provider's protection without additional analysis. Although the manipulation of this cookie attribute only works for a certain amount of time (not measured in the experiment), the attack can be carried out with ease.

The proposed application contains some operations created to exploit these vulnerabilities and bypass these security controls.

The Capture-Cookie operation is a script that captures the cookies generated by CAPTCHA for future reuse in the attack. The Generate-Proxy-List operation is responsible for generating a list of proxy server addresses that can be used during the attack. The purpose of this operation is to anonymize requests by dividing them into multiple proxies, which makes it difficult to detect the attacker and block IP addresses on the target provider's Web Application Firewall (WAF). In fact, the recommendation is that the user create and use their own list of proxy servers, since the list automatically generated by the Generate-Proxy-List operation may contain public Internet proxies, which are generally slower and more unstable.

However, for the attack to be successful, the Capture-Cookie and Generate-Proxy-List operations must not be active simultaneously in the application (Figure 1). The reason is simple: there is an attribute present in the cookie called

cf_clearance that depends on the IP used to generate the CAPTCHA and that must be used repeatedly during the attack requests. When the Capture-Cookie operation is enabled in the application, the authenticated cookie is captured. However, if the Generate-Proxy-List operation is also enabled, requests are sent randomly from several proxies with different IP addresses (spoofing). This makes the attack much more difficult, as the reuse of the cookie is not feasible, since this change forces the execution of several CAPTCHA and the generation of numerous different cookies. Therefore, the Generate-Proxy-List operation can be used when the target domain does not have the CAPTCHA generation function enabled (Under Attack).

The goal of the Endpoint-Discovery operation is to find the most computationally expensive endpoints (pages and API calls) associated with the target domain's home page. The idea is that requests that consume more resources (memory and data, for example) are more useful during a DoS attack. To do this, the Endpoint-Discovery operation performs a test that checks which are the heaviest pages that make up the target domain. This is done by reusing the captured cookies to prevent the generation of the CAPTCHA when the Under-Attack mode is active on the main domain - when the Under-Attack mode is disabled on the target domain there are no CAPTCHA and the pages can be requested without the help of cookies. The Endpoint-Discovery operation also detects API calls in the target domain's internal links (href). The advantage of this is that API calls are usually heavier than standard calls. Thus, the operation always chooses the heavier endpoint, be it an API or standard call.

From the information about the pages (URL), the one that consumes the most resources (heavy) of the target domain is the one that will be used.

C. Attack Module

The Malicious Request Generation operation is responsible for generating plain text HTTP requests using simulations of real headers with random data. This operation serves to make it difficult to track and block traffic analysis tools; it allows both the generation of generic requests and the generation of specific requests to be used when the target domain has Under Attack protection enabled, including cookies and a User-Agent provided by the Capture-Cookie operation. These headers are written to a local file for later use and analysis.

The attack occurs by sending malicious requests to the target domain, which compromises the website's availability.

IV. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL ENVIRONMENT

The experiment created to validate the proposal is quite simple. A public domain was acquired (tranquilosec.com.br) and a home page was hosted publicly through the Cloudflare Tunnel tool - a service used to securely connects a local server, application, or network to the internet with an encrypted link, ensuring secure external access. Meanwhile, a Windows 10 desktop connected to the Internet was used as an attack machine. The settings used in the experiment can be seen in Table I.

TABLE I
MACHINE SETTINGS.

Machines	Settings	Link	Average packets/min.
Attack machine	Desktop AMD Ryzen 3 Pro 16 GB RAM	600 MB/s	1,312,292
Target domain	Desktop AMD Ryzen 9 5950x 32 GB RAM		

The attack program is written in Python 3 from DoomsDay, an open-source script for testing attacks against availability. The program supports a variety of techniques including multi-threading, multiprocessing, dynamic HTTP header generation, proxying, optional tracker-based target selection, and bypass methods for cloud protection layers. More details can be found in the repository that provides the program used in the experiment: <https://github.com/TranquiloSec/doomsday>.

The script used in the attack also allows more than one source to participate in the attack.

A. Discussion of the Results

We did several attack experiments against the target domain. In one of the experiments, in which time was measured, with one machine carrying out the attack, **the target domain became unavailable in about 5 – 8 seconds with a flow of about 21,871 packets/s** (Figure 3), when the CPU usage of attacker is in the maximum percentage. The main results can be seen in Table III.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
22	0.000151	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38332 → 443 [SYN] Seq=0 W
23	0.000156	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38364 → 443 [SYN] Seq=0 W
24	0.000158	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38665 → 443 [SYN] Seq=0 W
25	0.000160	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38381 → 443 [SYN] Seq=0 W
26	0.000166	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38712 → 443 [SYN] Seq=0 W
27	0.000167	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38424 → 443 [SYN] Seq=0 W
28	0.000174	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38744 → 443 [SYN] Seq=0 W
29	0.000174	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38441 → 443 [SYN] Seq=0 W
30	0.000181	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38761 → 443 [SYN] Seq=0 W
31	0.000182	192.168.1.200	104.21.16.1	TCP	66	38473 → 443 [SYN] Seq=0 W

```

> Frame 22: 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interfa
> Ethernet II, Src: GigaByteTech_f6:1f:6d (d8:5e:d3:f6:1f:6d), Dst: 98:39:10:5b:
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.200, Dst: 104.21.16.1
> Transmission Control Protocol, Src Port: 38332, Dst Port: 443, Seq: 0, Len: 0
  Source Port: 38332
  Destination Port: 443
  [Stream index: 21]
  [Conversation completeness: Incomplete, SYN_SENT (1)]
  [TCP Segment Len: 0]
  Sequence Number: 0 (relative sequence number)
  Sequence Number (raw): 4249051018
  [Next Sequence Number: 1 (relative sequence number)]
  Acknowledgment Number: 0
  Acknowledgment number (raw): 0
  1000 .... = Header Length: 32 bytes (8)
  > Flags: 0x002 (SYN)
  Window: 64240
  [Calculated window size: 64240]

```

Fig. 3. SYN flood captured by sniffer.

The Table III shows the number and average size of packets sent in the attack. It also provides some statistics about malicious traffic in a 15 s time frame. Figure 4 shows shows more percentages related to the attack.

TABLE II
MAIN RESULTS.

Packet Lengths: 15 seconds sample attack					
Topic Item	Count	Aver.	Min Max Val	Rate (ms)	%
40-79	262474	64.79	46-78	17.4412	79.93%
80-159	7595	113.33	81-159	0.5047	2.31%
160-319	2175	188.58	160-319	0.1445	0.66%
320-639	29705	557.38	321-624	1.9739	9.05%
640-1279	2088	994.81	674-1279	0.1387	0.64%
1280-2559	24094	1473.14	1284-1799	1.601	7.34%
2560-5119	224	3385.25	2854-4254	0.0149	0.07%
5120 and greater 7	9054	5654	16854-0	0.00%	0.02
Packet Lengths	328362	223	-	21.8194	100%

Parameter	Captured	Summary
Ethernet	Count: 135 Mbps Name de dispositivo: Ethernet 1 Tipo de conexão: 100 Mb/s, 1.200 Endereço IPv4: 2004:5ac:81:800e:1044:7eaa:70e7 Endereço IPv6: 41,6 Mbps	Send: 135 Mbps Receive: 41,6 Mbps
CPU	Utilização: 100% Velocidade: 4,44 GHz Processos: 174 Tarefas: 237581 Memória utilizada: 1548202 Tempo de atividade: 00:03:26	Utilização de Memória: 1,48 GB Sockets: 1 Núcleos: 16 Processadores físicos: 32 Virtualização: Habilitado Cache L1: 0,5 MB Cache L2: 0,5 MB Cache L3: 64,0 MB
Security	Encrypted requests: 2.36 M (75% HTML) Bandwidth: 2,52 GB	Usage: 100% Process: 174 Threads: 237,581 Identifiers: 1,548,202

Fig. 4. Percentages related to 15 s attack.

B. Forms of Mitigation

All AT described in this article are based on the exploitation of some vulnerabilities. The solution to these flaws can significantly limit and even completely render the proposed malicious actions unfeasible.

The most exploited vulnerability in the attack is the manipulation and/or reuse of the cookie when sending malicious requests. Therefore, one possible solution to the attack is to reduce the cookie's validity period, preventing its reuse after a period. Although this is simple, it can lead to excessive authentication that tends to make access slower and more difficult for the user. A counter that controls the number of requests for the same cookie in a short period of time can work well in this situation, as long as it does not prevent legitimate access.

Enabling the mechanism to block malicious requests from the target domain to the same IP address is not an efficient way to mitigate the attack, since the headers generated in the Malicious-Request-Generation operation spoof the requests. However, this is a measure that always helps to mitigate this type of attack.

Our experiment is built in Python using a browser automator called Selenium¹. Thus, another form of mitigation is the use of mechanisms that identify the use of automated browsers, which are often used in attacks. This is done by checking some browser properties (for example, navigator.webdriver) that are used in automation. Analysis of inconsistencies in HTTP headers and JavaScript implementation can also indicate automation.

¹<https://www.selenium.dev/>

V. CONCLUSION

The current article details the execution of a DoS attack generated by excessive requests to a website hosted by a great web provider, based on a challenge proposed in a CyberSecurity graduation course at São Paulo. The main objective was to show how some vulnerabilities can be exploited in stages by building an AT.

The proposal involved the development of an AT and the creation of an application that enabled an experiment to be carried out that explored some vulnerabilities, such as the reuse of parameters in malicious requests. This was possible through the manipulation of cookies during the use or not of CAPTCHA by the target domain. The generation of manipulated HTTP headers was also part of the attack and made it difficult for the target domain's security controls to block malicious requests.

The results obtained demonstrate that the proposed attack can be implemented in environments with little complexity. The attack can occur from a single attack source (DoS) or from multiple sources (DDoS). If the target domain has the exploited vulnerabilities, it is possible to slow down the victim's web service or even take it down completely within a few seconds (5 - 8 s). The paper also suggests actions to mitigate the effects of the attack and to fix the exploited vulnerabilities.

However, there are a number of limitations that need to be addressed. The exploited vulnerabilities are not common to all sites and environments, but rather to the target domain/provider tested in this article. The tests were also very limited. Ideally, more tests on different vulnerable domains should be performed. Improvements to the scripts are also necessary and can make the attack more efficient. Therefore, further tests and experiments are the natural pathways to continue this research.

The source code of the application used to conduct the experiments is available².

REFERENCES

- [1] M. Yue, H. Wang, L. Liu, and Z. jun Wu, "Detecting dos attacks based on multi-features in sdn," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 104 688–104 700, 2020.
- [2] C. Yang, W. Yang, and H. Shi, "Dos attack in centralised sensor network against state estimation," *IET Control Theory Applications*, 2018.
- [3] B. Gupta and O. P. Badve, "Taxonomy of dos and ddos attacks and desirable defense mechanism in a cloud computing environment," *Neural Computing and Applications*, vol. 28, pp. 3655–3682, 2017.
- [4] W. Bongiovanni, A. E. Guelfi, E. Pontes, F. Zhou, and S. T. Kofuji, "Viterbi algorithm for detecting ddos attacks," in *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)*. IEEE, 2015, pp. 209–212.
- [5] A. A. A. da Silva, L. S. Silva, E. L. Bezerra, A. E. Guelfi, C. de Armas, M. T. de Azevedo, and S. T. Kofuji, "A proposal to distinguish ddos traffic in flash crowd environments," *International Journal of Information Security and Privacy (IJISP)*, vol. 16, no. 1, pp. 1–16, 2022.
- [6] A. Huseinović, S. Mrdović, K. Bicakci, and S. Uludag, "A survey of denial-of-service attacks and solutions in the smart grid," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 177 447–177 470, 2020.
- [7] L. Gao, Y. Li, L. Zhang, F. Lin, and M. Ma, "Research on detection and defense mechanisms of dos attacks based on bp neural network and game theory," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43 018–43 030, 2019.

²<https://github.com/TranquiloSec/doomsday>

- [8] D. Tang, S. Zhang, J. Chen, and X. Wang, "The detection of low-rate dos attacks using the sadbscan algorithm," *Inf. Sci.*, vol. 565, pp. 229–247, 2021.
- [9] R. SaiSindhuTheja and G. Shyam, "An efficient metaheuristic algorithm based feature selection and recurrent neural network for dos attack detection in cloud computing environment," *Appl. Soft Comput.*, vol. 100, p. 106997, 2021.
- [10] P. H. H. N. de Araujo, A. Silva, N. F. Junior, F. Cabrini, A. Santiago, A. Guelfi, and S. Kofuji, "Impact of feature selection methods on the classification of ddos attacks using xgboost," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 200–214, 2021.
- [11] A. Silva, E. Pontes, F. Zhou, A. Guelfi, and S. Kofuji, "Prbs/ewma based model for predicting burst attacks (brute force, dos) in computer networks," in *Ninth International Conference on Digital Information Management (ICDIM 2014)*. Ieee, 2014, pp. 194–200.
- [12] J. Gao, S. Chai, B. Zhang, and Y. Xia, "Research about dos attack against icps," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 19, 2019.
- [13] H. Yuan and Y. Xia, "Resilient strategy design for cyber-physical system under dos attack over a multi-channel framework," *Inf. Sci.*, vol. 454–455, pp. 312–327, 2018.
- [14] E. R. Russo, A. Di Sorbo, C. A. Visaggio, and G. Canfora, "Summarizing vulnerabilities' descriptions to support experts during vulnerability assessment activities," *Journal of Systems and Software*, vol. 156, pp. 84–99, 2019.
- [15] S. Camtepe and B. Yener, "Modeling and detection of complex attacks," *2007 Third International Conference on Security and Privacy in Communications Networks and the Workshops - SecureComm 2007*, pp. 234–243, 2007.
- [16] M. Vaziri-Pashkam, S. M. Cormiea, and K. Nakayama, "Predicting actions from subtle preparatory movements," *Cognition*, vol. 168, pp. 65–75, 2017.
- [17] L. Xiao-ran, "Analysis and defense of enhanced attack tree—based complex attacks," *Communications Technology*, 2009.
- [18] H. Mantel and C. W. Probst, "On the meaning and purpose of attack trees," *2019 IEEE 32nd Computer Security Foundations Symposium (CSF)*, pp. 184–18415, 2019.
- [19] N. F. Syed, Z. Baig, A. Ibrahim, and C. Valli, "Denial of service attack detection through machine learning for the iot," *Journal of Information and Telecommunication*, vol. 4, no. 4, pp. 482–503, 2020.
- [20] M. M. Salim, S. Rathore, and J. H. Park, "Distributed denial of service attacks and its defenses in iot: a survey," *The Journal of Supercomputing*, vol. 76, pp. 5320–5363, 2020.
- [21] S. Sambangi and L. Gondi, "A machine learning approach for ddos (distributed denial of service) attack detection using multiple linear regression," in *Proceedings*, vol. 63, no. 1. MDPI, 2020, p. 51.
- [22] W. Zhijun, L. Wenjing, L. Liang, and Y. Meng, "Low-rate dos attacks, detection, defense, and challenges: A survey," *IEEE access*, vol. 8, pp. 43 920–43 943, 2020.
- [23] D. Tang, X. Wang, Y. Yan, D. Zhang, and H. Zhao, "Adms: An online attack detection and mitigation system for ldos attacks via sdn," *Computer Communications*, vol. 181, pp. 454–471, 2022.
- [24] J. David and C. Thomas, "Discriminating flash crowds from ddos attacks using efficient thresholding algorithm," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 152, pp. 79–87, 2021.
- [25] M. Kumar, M. Jindal, and M. Kumar, "A systematic survey on captcha recognition: types, creation and breaking techniques," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 1107–1136, 2022.
- [26] J. L. Intumwayase, I. Fouad, P. Laperdrix, and R. Rouvov, "Ua-radar: Exploring the impact of user agents on the web," in *Proceedings of the 22nd Workshop on Privacy in the Electronic Society*, 2023, pp. 31–43.

AUTHORS

Cauã M. Borowczak Cauã

Manfredi Borowczak holds a technical high school diploma in IT from FECAP and is currently studying Cybersecurity at FIAP. With 3 years of experience in network management, computer maintenance, and Windows server administration for small businesses.



Enzo M. D'andrea

Enzo Miziara holds a technical degree in Informatics from FECAP (2023) and is in the final stages of completing a Technology degree in Cybersecurity at FIAP. He currently works as a Junior Security Analyst at DiaZero Security..



Anderson A. A. Silva Anderson

Aparecido Alves da Silva holds a PhD in Computer Engineering (USP 2016) and has completed 2 post-docs in engineering. He worked for 23 years in the private sector and is currently a researcher and university professor. His line of research is information security.



Adilson E. Guelfi Adilson E. Guelfi

Adilson E. Guelfi holds a PhD in Electrical Engineering from Poli-USP. Adilson served as technical manager of LSI-TECH and currently holds the position of Dean of Research and Graduate Studies at UNOESTE, São Paulo, Brazil.



Proposta de Arquitetura para um Registrador Eletrônico de Ponto com Integração Móvel

Camila Schmitt Soares, Jorge Luis Boeira Bavaresco
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense - Campus Passo Fundo
camilasoares.pf114@academico.ifsul.edu.br, jorgebavaresco@ifsul.edu.br

Abstract—Technological advances have driven the search for simpler and more efficient solutions in business management. In this context, this paper proposes the architecture of an electronic timekeeping system (REP) with mobile integration, using NFC and biometrics for authentication. The proposal seeks to modernize workday control, providing more practicality, security and accuracy.

Index Terms—Automation, Biometrics, Time control, Mobile integration, Business management, NFC.

Resumo—O avanço tecnológico tem impulsionado a busca por soluções mais simples e eficientes na gestão empresarial. Nesse contexto, este trabalho propõe a arquitetura de um sistema registrador eletrônico de ponto com integração móvel, utilizando NFC ou biometria para autenticação. A proposta busca modernizar o controle de jornada, proporcionando mais praticidade, segurança e precisão.

Palavras chave—Automação, Biometria, Controle de ponto, Integração móvel, Gestão empresarial, NFC.

I. INTRODUÇÃO

A automação tem se consolidado como um pilar essencial na modernização dos processos empresariais, proporcionando maior eficiência, precisão e segurança na gestão de informações. Nesse contexto, a escolha de um sistema de controle de ponto eficaz surge como um desafio estratégico, uma vez que um bom trabalho de gestão de pessoas inclui ter um entendimento de que grande parte dos problemas enfrentados no dia a dia é fruto de deficiências em procedimentos corriqueiros, como o próprio controle da jornada de trabalho dos seus profissionais [1].

A escolha deste tema se justifica pela necessidade de uma solução que modernize e otimize a gestão de ponto, unindo praticidade, segurança e eficiência às demandas das empresas. Este estudo propõe a arquitetura de um sistema registrador eletrônico de ponto (REP) integrado a um aplicativo móvel, utilizando tecnologias como *Near Field Communication* (NFC) e biometria para autenticação. Além de simplificar o controle da jornada de trabalho, a proposta visa proporcionar maior comodidade aos colaboradores e aprimorar a precisão e agilidade na coleta e gestão de dados.

A contribuição deste trabalho é voltada para instituições que enfrentam desafios com sistemas de controle de ponto tradicionais, frequentemente ineficazes ou de difícil operação. A implementação de um REP integrado a dispositivos móveis moderniza a gestão da jornada de trabalho, simplificando a administração dos dados e oferecendo uma solução mais acessível e eficiente. Além de otimizar processos, essa abordagem fortalece a organização e a conformidade, tornando-se especialmente relevante para empresas que buscam inovação

e competitividade em um mercado em constante evolução tecnológica.

O trabalho está estruturado em quatro seções: a Seção I: Introdução apresenta o contexto e os objetivos da pesquisa; a Seção II: Referencial Teórico explora os conceitos e estudos relevantes; a Seção III: Metodologia descreve os métodos e procedimentos utilizados; e a Seção IV: Conclusão sintetiza os resultados e aponta possíveis direções futuras.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, exploraremos os fundamentos da automação e sua eficiência, além dos principais conceitos e da importância do REP, incluindo aspectos de segurança e legislação. Serão também apresentadas as tecnologias específicas que serão utilizadas no desenvolvimento do projeto.

A. Automação Empresarial

Com a transformação digital, muitas instituições buscam maneiras de melhorar seu desempenho no mercado, seja otimizando custos, aprimorando fluxos de trabalho ou controlando suas operações de forma mais eficiente. Como resultado dessa busca, a automação tem se tornado cada vez mais reconhecida e desejada, pois pode ser aplicada em diversas áreas de uma empresa. A automação envolve a utilização de tecnologias, programas, robótica e processos para alcançar resultados com o mínimo de intervenção humana [2].

Automatizações voltadas para organizações são conhecidas como automações empresariais, ou seja, são processos manuais substituídos por processos automáticos baseados em recursos tecnológicos. Essas melhorias podem incluir desde atividades simples, como o envio automático de e-mails, até sistemas mais complexos, como o controle inteligente de energia.

O principal objetivo da automação empresarial é aumentar a eficiência nas atividades diárias e internas por meio de recursos computacionais. Sua implementação é ágil e requer pouco treinamento dos colaboradores, pois é orientada pela simplificação, aceleração e melhoria contínua das tarefas.

B. Registrador Eletrônico de Ponto

O REP é amplamente utilizado em diversas instituições, pois é responsável por registrar a jornada de trabalho dos colaboradores, garantindo organização e controle preciso dos horários. Ele deve cumprir requisitos específicos estabelecidos pelo Ministério do Trabalho, visando garantir a integridade e autenticidade dos dados registrados, prevenindo fraudes ou manipulações.

De acordo com o regulamento [3] sobre a Portaria 671, publicado pelo Ministério do Trabalho e Previdência, que atualiza e estabelece normas relacionadas à jornada de trabalho nas empresas, existem três tipos de modelos de REP:

- REP-C: registro de ponto convencional;
- REP-A: modelo alternativo que utiliza *softwares* e equipamentos de *hardware*, e requer autorização via Convenção Coletiva de Trabalho (CCT) ou acordo coletivo;
- REP-P: *softwares* de ponto digital que não necessitam de vínculo com aparelhos físicos.

b.1) Funcionalidades do REP-C

O REP-C é um modelo tradicional de registrador eletrônico de ponto que requer aprovação do INMETRO e conformidade com a Portaria 1486 [4]. Suas características incluem um relógio interno de tempo real, mostrador digital, bobina de papel e armazenamento permanente de dados. Embora amplamente utilizado, apresenta desvantagens como maior suscetibilidade a falhas e necessidade frequente de manutenção, o que compromete sua eficiência e confiabilidade.

b.2) Funcionalidades do REP-A

O REP-A, ou modelo alternativo, é um sistema híbrido que permite tanto o registro manual quanto o uso de aplicativos e sistemas digitais. Regulamentado pelo artigo 77 da Portaria 671, deve estar previsto no contrato de trabalho ou autorizado pela CCT. Suas principais características incluem a identificação do empregador e do empregado, além da possibilidade de extração remota das marcações para fiscalização. No contexto digital, permite a geração de comprovantes em formato PDF com assinatura digital [5], tornando o processo mais seguro e acessível.

b.3) Funcionalidades do REP-P

O REP-P é um registrador eletrônico de ponto baseado em software, permitindo registros via dispositivos conectados à internet, como celulares, tablets e computadores. Regulamentado pelo anexo IX da Portaria 1486 [6], exige registro no INPI. Suas principais características incluem acesso facilitado para colaboradores, flexibilidade nos registros, menor custo de manutenção em comparação aos dispositivos físicos e suporte para assinatura eletrônica. Totalmente digital, o REP-P otimiza a gestão de ponto, tornando o processo mais ágil e acessível tanto para os funcionários quanto para o setor de Recursos Humanos.

C. NFC

O *Near Field Communication* (NFC) é uma tecnologia de comunicação sem fio de curto alcance que permite a troca rápida e segura de dados entre dispositivos próximos. Muito utilizada em pagamentos por aproximação, sua criação se deu em 2004, com a fundação do NFC Forum por Nokia, Philips e Sony [7].

Derivado do RFID, o NFC opera na frequência de 13,56 MHz, com alcance máximo de 20 cm, sendo mais seguro contra interceptações [7]. Ele funciona por meio da interação entre um dispositivo iniciador (que controla a conexão) e um alvo (que responde à comunicação), podendo operar de forma ativa (com

alimentação própria, como celulares) ou passiva (sem fonte de energia, como cartões e tags NFC).

Seus principais modos de operação estão representados na Figura 1 e incluem:

- Leitura e Escrita: gravação e leitura de dados em tags NFC.
- Emulação de Cartão: uso do dispositivo como cartão inteligente.
- *Peer-to-Peer*: permite que dispositivos compatíveis troquem dados entre si, de forma rápida e instantânea.

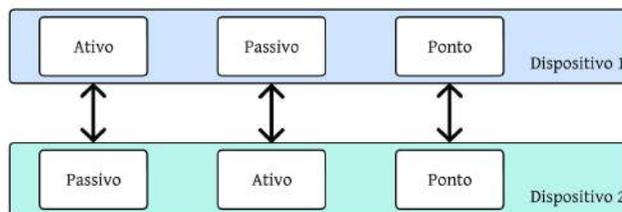


Fig. 1. Dois dispositivos NFC e as suas possibilidades de configuração [8].

Essa versatilidade faz do NFC uma solução eficiente para pagamentos, autenticações e integração com dispositivos inteligentes.

D. Biometria

A biometria é um método de autenticação baseado em características físicas e comportamentais únicas, garantindo maior segurança e precisão na identificação de indivíduos [9]. Utilizada no controle de acesso, investigações e proteção de dados, ela reduz o risco de acessos não autorizados em comparação a sistemas baseados apenas em senhas.

Um dos métodos mais comuns é a impressão digital, amplamente adotada por seu baixo custo e alta confiabilidade. Como as digitais possuem baixa mutabilidade ao longo da vida, essa tecnologia evoluiu para sistemas digitais mais precisos e acessíveis. Apesar de eventuais limitações, como desgaste das digitais, a biometria continua sendo uma solução segura e eficaz para autenticação [9].

III. METODOLOGIA

Esta seção apresenta a arquitetura proposta para o sistema de registro eletrônico de ponto com integração via aplicativo móvel.

A. Descrição do Modelo Proposto

O modelo proposto neste trabalho apresenta um sistema avançado de registro eletrônico de ponto, integrado a um aplicativo móvel. Sua arquitetura será projetada para ser mais prática, segura e precisa, utilizando tecnologias recentes e otimizadas. Com autenticação via NFC ou biometria, o sistema garantirá um controle de presença eficiente e confiável. Além disso, a integração com dispositivos móveis proporcionará uma interface intuitiva e acessível, simplificando a coleta e o gerenciamento dos dados de ponto.

B. Arquitetura Física

A arquitetura física proposta neste trabalho foi desenvolvida para integrar tecnologias modernas, com o objetivo de proporcionar um sistema eficiente, seguro e de fácil operação para o controle de ponto eletrônico. A Figura 2 ilustra os principais componentes eletrônicos que compõem essa arquitetura.

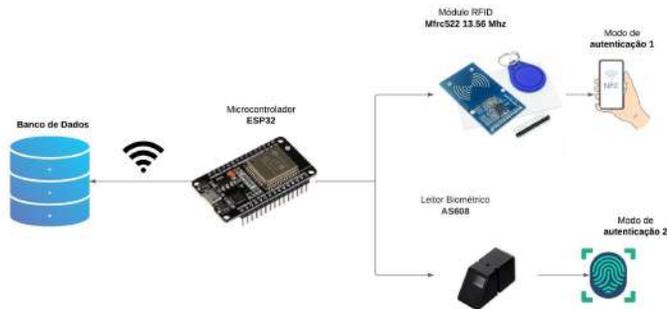


Fig. 2. Arquitetura física.

O microcontrolador, elemento central da solução, é o módulo Espressif ESP-WROOM-32, escolhido por seu suporte integrado a Wi-Fi e Bluetooth, facilitando a conectividade do sistema. Ele será responsável por capturar os dados do registro de ponto e transmiti-los ao banco de dados, garantindo que sejam enviados de forma segura para armazenamento e posterior processamento.

O módulo NFC/RFID selecionado é o Mfrc522, um chip desenvolvido pela NXP Semiconductors com a tecnologia MIFARE, que permite a leitura de cartões inteligentes sem contato e segue o padrão ISO/IEC 14443 Tipo A, operando a 13,56 MHz [10]. De acordo com [11] a ISO 14443 é uma norma internacional que descreve como os cartões e terminais sem contato devem funcionar para garantir compatibilidade em todo o setor.

Para a autenticação biométrica, o leitor AS608 foi escolhido. Este sensor óptico de impressão digital é otimizado para projetos de automação, proporcionando alta precisão na captura de digitais com o auxílio de um chip processador digital de sinais (DSP) de alta potência, além de ser de fácil integração e uso [12].

A escolha desses componentes também considerou o conceito de *Commercial off-the-shelf* (COTS), ou seja, são produtos prontos para uso e amplamente disponíveis no mercado. Isso garante não apenas a viabilidade da implementação, mas também facilita a manutenção e o aprimoramento do sistema, visto que há uma vasta documentação e suporte técnico disponível para cada um desses dispositivos. Além disso, devido à alta disponibilidade, esses produtos também se tornam mais acessíveis financeiramente, reduzindo os custos do projeto. Esses fatores são fundamentais para acelerar o desenvolvimento e minimizar riscos na implementação.

C. Arquitetura de Software

A arquitetura de *software* apresentada na Figura 3 descreve um sistema integrado para controle de ponto eletrônico, estruturado em três componentes principais: administradores, colaboradores e o registrador eletrônico de ponto. O acesso

ao sistema por administradores e colaboradores ocorre por meio de um aplicativo móvel, promovendo flexibilidade e acessibilidade.

Todas as operações, incluindo o registro de ponto, atualizações e consultas, serão centralizadas por uma *API Express*, que gerenciará a comunicação com o servidor e o banco de dados para armazenamento e processamento das informações. O sistema seguirá o estilo arquitetônico REST. O REP enviará os dados por meio de requisições POST, enquanto as demais plataformas utilizarão os métodos GET, POST, PUT e DELETE, conforme a funcionalidade requerida.

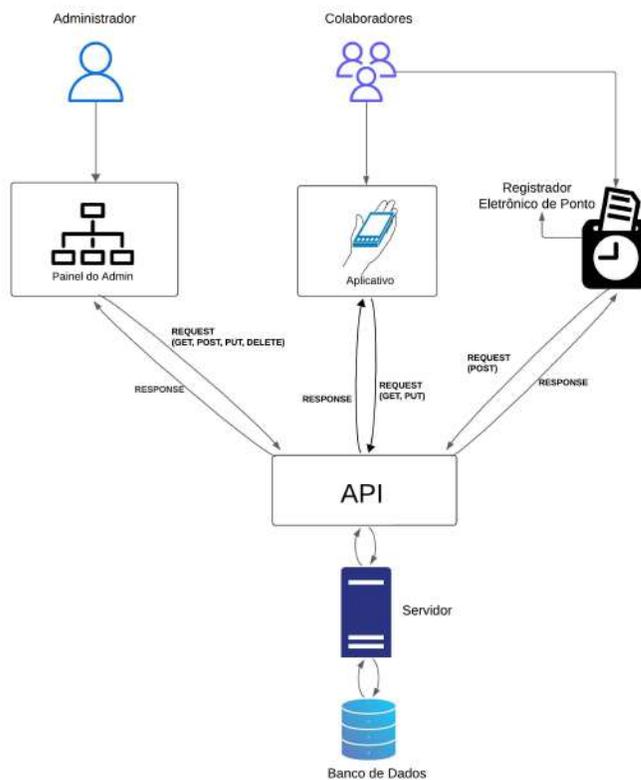


Fig. 3. Arquitetura de software.

Essa arquitetura irá promover eficiência e escalabilidade, otimizando a comunicação entre os componentes e assegurando a integridade das informações por meio de um banco de dados centralizado. A centralização das operações na API simplificará a manutenção do sistema e facilitará a integração de novos módulos no futuro. Ademais, o acesso em tempo real por meio de aplicativo atenderá às demandas de mobilidade das organizações modernas, oferecendo uma solução prática, robusta e adaptada às necessidades da gestão de ponto eletrônico.

c.1) Tecnologias

O aplicativo móvel será desenvolvido utilizando *React Native*, um *framework* de código aberto criado pela Meta Platforms, Inc. em 2015 [13]. A linguagem escolhida para o desenvolvimento será TypeScript, proporcionando um código mais seguro, robusto e de fácil manutenção.

A comunicação entre o aplicativo e a API será realizada por meio de requisições *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP),

utilizando a biblioteca Axios para simplificar as chamadas e o tratamento de respostas. Além disso, a autenticação dos usuários será baseada em *JSON Web Token* (JWT), garantindo segurança e integridade na troca de informações.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma proposta de arquitetura para um registrador eletrônico de ponto com integração móvel, visando oferecer maior praticidade e eficiência. A solução faz uso de tecnologias como NFC e biometria para aumentar a segurança e a confiabilidade do registro de ponto. Além disso, abrange tanto o hardware necessário para a captura dos registros quanto o software responsável pelo gerenciamento e administração eficaz dos dados.

Como perspectivas futuras, a implementação prática do protótipo e do software será fundamental, assim como a realização de testes funcionais em diferentes cenários para validar seu desempenho. A partir dos testes e dos *feedbacks*, será possível aperfeiçoar a arquitetura e aprimorar a usabilidade, garantindo que o sistema atenda plenamente às necessidades operacionais. Além disso, novas integrações com sistemas corporativos poderão ser exploradas, ampliando a eficiência e a aplicabilidade da solução.

REFERÊNCIAS

- [1] Julia Neves. *Ponto digital: como implantar um controle de ponto online?* URL: <https://www.oitchau.com.br/blog/ponto-digital-como-implantar-um-controle-de-ponto-online/> (acesso em 08/03/2025).
- [2] IBM. *O que é automação?* URL: www.ibm.com/br-pt/topics/automation (acesso em 08/03/2025).
- [3] Ministério do Trabalho e Previdência/Gabinete do Ministro. *PORTARIA/MTP Nº 671, DE 8 DE NOVEMBRO DE 2021*. URL: in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-359094139 (acesso em 08/03/2025).
- [4] Ministério do Trabalho e Previdência/Gabinete do Ministro. *PORTARIA MTP Nº 1.486, DE 3 DE JUNHO DE 2022*. URL: www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mtp-n-1.486-de-3-de-junho-de-2022-405577190 (acesso em 08/03/2025).
- [5] Leandro Cazeiro. *REP-A: saiba o que é registrador eletrônico de ponto alternativo*. URL: tangerino.com.br (acesso em 08/03/2025).
- [6] Aline Mesquita. *Portaria 671: tudo que você precisa saber sobre ela!* URL: www.oitchau.com.br/blog/portaria-671 (acesso em 08/03/2025).
- [7] Emerson Alecrim e Ana Marques. *O que é NFC? Como funciona a tecnologia em celulares e cartões*. URL: tecnoblog.net/responde/o-que-e-nfc (acesso em 08/03/2025).
- [8] Alessandro Cunha. *NFC (Near Field Communication) – Aplicações e uso*. URL: <https://embarcados.com.br/nfc-near-field-communication/> (acesso em 12/03/2025).
- [9] Ronaldo Gogoni. *O que é biometria? Os 6 tipos mais usados na tecnologia*. URL: tecnoblog.net/responde/o-que-e-biometria-tecnologia (acesso em 08/03/2025).

- [10] Robocore. *Kit RFID Mfrc522 (13,56MHz)*. URL: www.robocore.net/rfid/kit-rfid-mfrc522?srsId=AfmBOorDayqe_Zk0XC6JCCdI8CnYDVqrXa7NHRef6izLHU1r_qzF32HS (acesso em 08/03/2025).

- [11] Thales. *O que é ISO 14443?* URL: www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/technology/iso14443 (acesso em 08/03/2025).

- [12] Usinainfo. *Leitor Biométrico para Arduino AS608 + Cabo*. URL: www.robocore.net/rfid/kit-rfid-mfrc522?srsId=AfmBOorDayqe_Zk0XC6JCCdI8CnYDVqrXa7NHRef6izLHU1r_qzF32HS (acesso em 08/03/2025).

- [13] Sobre Cunha. *React Native: o que é e tudo sobre o Framework*. URL: <https://www.alura.com.br/artigos/react-native?srsId=AfmBOor7w8tp6t903T0YU2C0kJDQTIItMobOXYpvjoz6vpYT9y5> (acesso em 12/03/2025).

AUTORES

Camila Schmitt Soares Graduada em Ciência da Computação pelo Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IF-SUL), atualmente no 8º período. Possui quatro anos de experiência na área de tecnologia, com foco em DevOps, atuando na automação de processos, gestão de infraestrutura e implementação de práticas de CI/CD.



Jorge Luis Boeira Bavaresco Mestre em Computação Aplicada pela Universidade de Passo Fundo (2015), Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Universidade de Passo Fundo (2009), Especialista em Desenvolvimento de Software pela Universidade de Passo Fundo (2011) e Licenciado com Habilitação em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pelo Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (2021).



Atualmente é Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Instituto Federal Sul-Rio-Grandense - Campus Passo Fundo. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Linguagens de Programação e Bancos de Dados, atuando principalmente nos seguintes temas: Desenvolvimento de Sistemas para a WEB com ênfase em frameworks e bibliotecas Java Script, Bancos de dados Relacionais e Não Relacionais, Padrões Arquiteturais de aplicações web contemporâneas e Modelagem e Simulação Computacional de aplicações agrícolas.

Estudo Sobre Técnicas de Programação para Robô na Categoria Sumô LEGO® Utilizando o Controlador EV3 Intelligent Brick

Alexandre B. Lugli, Camila A. Alves, Eugênio M. J. da Silva, Egídio R. Neto, Luiz Fernando D. R. dos Santos, Maria Fernanda P. Castro, Wanderson E. Saldanha
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
baratella@inatel.br, camila.aversani@gel.inatel.br, eugenio@inatel.br, egidioneto@inatel.br, luizf.santos@inatel.br, maria.castro@gea.inatel.br, wsaldanha@inatel.br

Abstract—This study explores programming techniques for robots in the LEGO® Sumo category, using the EV3 Intelligent Brick controller as the main tool. Developed in the Robotbulls laboratory at the National Institute of Telecommunications (INATEL), the research analyzes competition rules, features of LEGO® controllers, and programming languages applied in this context, such as RobotC and block-based programming. The comparison between EV3 and NXT controllers, as well as the challenges associated with EV3 usage, are also discussed. The results emphasize programming as a competitive advantage, significantly impacting the success of teams in robotics tournaments.

Index Terms—Educational Robotics, EV3 Controller, LEGO® Sumo.

Resumo—Este estudo aborda técnicas de programação para robôs na categoria Sumô LEGO®, utilizando o controlador EV3 Intelligent Brick como ferramenta principal. Desenvolvido no laboratório Robotbulls do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), o trabalho analisa regras da competição, características de controladores LEGO® e linguagens de programação aplicadas ao contexto, como RobotC e programação por blocos. A comparação entre controladores EV3 e NXT, assim como os desafios associados ao uso do EV3, também são discutidos. Os resultados destacam a importância da programação como diferencial competitivo, com impactos significativos no sucesso das equipes em torneios de robótica.

Palavras chave—Controlador Ev3, Sumô LEGO®, Robótica Educacional.

I. INTRODUÇÃO

A empresa LEGO®, fundada em 10 de agosto de 1932, na Dinamarca, inicialmente criou peças de madeira. Após um incêndio no estoque, onde quase tudo foi perdido, surgiram as peças de plástico, que vêm ganhando cada vez mais fama até os dias atuais. [1]

O termo "Lego" vai muito além de peças de montar que estimulam a criatividade e a imaginação. O brinquedo existe há gerações e, cada vez mais, com novos modelos, cores e funcionalidades diferentes. Por exemplo, o uso de peças LEGO® para montar um robô de competição é uma funcionalidade recentemente atribuída. A categoria Sumô-LEGO® possui um nicho próprio nas lojas da marca, já que os robôs devem ser feitos exclusivamente de peças LEGO®.

O robô da categoria LEGO® possui um componente fundamental para o seu funcionamento, que são os controladores. Há alguns controladores atualmente no mercado, porém, nesse estudo vamos trabalhar especificamente do Controlador EV3 Intelligent Brick, que oferece ao robô diferentes benefícios.



Fig. 1. Robô Sumô LEGO®.

Este artigo está estruturado em quatro seções principais. Seção I (Introdução), seção II (Fundamentação teórica), seção III (Metodologia), seção IV (Estudo) e finalizando com a seção V (Conclusão).

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Regras

A categoria Sumô LEGO® segue um conjunto de regulamentos específicos estabelecidos pela RoboCore® [2]. Cada partida é disputada entre duas equipes, que, no local de competição, podem ser compostas por no máximo dois integrantes. No entanto, apenas um membro de cada equipe pode manipular o robô durante a partida.

Na categoria em questão, os robôs possuem limitações de tamanho, que são rigorosamente verificadas seguindo o gabarito da figura 2 utilizado para garantir que os robôs atendam às especificações de largura e comprimento máximos de 15,2 cm com altura ilimitada. Essas restrições dimensionais e de material, visam proporcionar um ambiente competitivo mais equilibrado e desafiador, incentivando os participantes a focarem nas estratégias de programação e na montagem dos robôs.

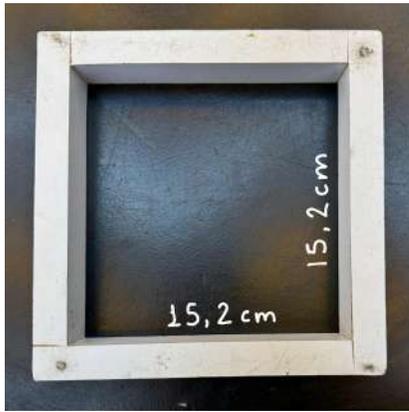


Fig. 2. Gabarito da RobotBulls.

O Dojô é a estrutura em que as partidas são realizadas, é delimitado por uma linha de borda branca com espessura de 2,5 cm, e formato circular, e deve ser construído em madeira laminada de alta pressão e ter 77 cm de diâmetro. Sua superfície conta com duas Shikiri (linhas de início) de cor marrom, posicionadas no centro do ringue, com largura de 1 cm, comprimento de 10 cm e espaçamento de 10 cm entre elas.



Fig. 3. Dojô da RobotBulls.

No início da partida, há uma contagem regressiva para que as equipes posicionem seus robôs atrás das Shikiri, conforme sua estratégia. Após outra contagem a rodada se inicia, e 5 segundos depois ambos devem sair da área de combate, afastando-se dos tapetes.

A partida pode terminar de duas formas: quando um robô é empurrado para fora do dojô ou cai e não consegue voltar à posição inicial, ou por nocaute, quando um robô para de funcionar totalmente, seja por falha técnica, falta de energia ou outro motivo.

B. Controladores

No contexto de sistemas robóticos, um controlador é um dispositivo ou sistema de software que recebe informações dos sensores (câmeras, sensores de distância etc.) e, com base nessas informações, emite comandos para os atuadores (motores), permitindo que o robô execute tarefas específicas ou reaja a estímulos do ambiente [3].

Na categoria Sumô LEGO®, as regras também se aplicam aos controladores utilizados, os quais devem ser da LEGO®. Os controladores mais utilizados pelas equipes de competição são:

- LEGO® NXT: Lançado em 2006, o NXT é um controlador de 32 bits projetado para permitir a criação de robôs autônomos. Embora seja mais simples em termos de capacidade de processamento e conectividade, o NXT ainda é utilizado em competições como o Sumô LEGO® devido à sua robustez e confiabilidade. [4]
- LEGO® EV3: Lançado em 2013, o EV3 é o modelo mais avançado da linha Mindstorms, oferecendo um processador mais rápido (ARM9 de 300 MHz), além de maior capacidade de conectividade e personalização. Sua versatilidade e poder de processamento o tornaram a escolha preferida para competições de robótica mais complexas, como o Sumô LEGO®. [5]
- LEGO® Spike Prime: Lançado em 2020, o Spike Prime é uma plataforma mais recente, com foco educacional. Equipado com um controlador ARM de 32 bits e suporte para programação baseada em blocos ou Python, é ideal para iniciantes, mas também pode ser utilizado em competições de robótica, como o Sumô LEGO®.

III. METODOLOGIA

A. Sensores

Os sensores são fundamentais na robótica, especialmente em competições como o Sumô LEGO®, onde precisão e rápida resposta ao ambiente são essenciais para o sucesso do robô. Em controladores LEGO®, como o NXT e o EV3, a integração de sensores variados melhora significativamente a interação do robô com o ambiente. O desempenho em competições de Sumô depende diretamente da capacidade do robô de perceber e reagir de forma eficiente. Os sensores mais usados incluem:

- Sensor Ultrassônico: mede a distância entre o robô e os objetos ao seu redor, sendo essencial para detectar obstáculos ou o adversário. Ele permite decisões rápidas, como ajustes de posicionamento ou evasivas, ajudando o robô a se mover de forma estratégica e precisa durante os combates.
- Sensor de Toque: detecta quando o robô entra em contato com objetos, como o oponente ou as bordas do dojô. Ele é crucial para estratégias como empurrões direcionados e reações a bloqueios, além de auxiliar no controle do comportamento do robô durante o combate.

B. Biblioteca em RobotC

No RobotC, não é possível criar bibliotecas da mesma forma que em outras linguagens de programação como C ou C++. Isso ocorre devido a limitações do próprio software, como:

- Ausência de Suporte a Arquivos Externos: O RobotC não permite a criação de bibliotecas no formato de arquivos separados que podem ser facilmente incluídos ou linkados em diferentes projetos.
- Estruturas de Dados Limitadas: A implementação das *structs* no RobotC não é tão flexível quanto em C/C++, o que dificulta a criação de bibliotecas que dependem de tipos de dados compostos.
- Organização de Código: O código no RobotC geralmente precisa ser contido em um único arquivo, limitando a modularização completa que as bibliotecas proporcionam.

Embora seja possível dividir o código em funções, a estrutura do RobotC não oferece um gerenciamento adequado para bibliotecas externas.

C. Linguagem de programação

c.1) Programação com Blocos(LEGO® Mindstorms EV3 Software)

A plataforma de programação do EV3, baseada em blocos gráficos, oferece uma maneira intuitiva de desenvolver o controle do robô, sendo uma excelente escolha tanto para iniciantes quanto para usuários mais avançados. Com essa interface gráfica, é possível construir programas arrastando e conectando blocos que representam funções como movimento, controle de sensores e decisões condicionais.

O programa de controle do robô, apresentado na figura 4, pode ser estruturado para definir comportamentos essenciais. Blocos de controle de motor são utilizados para determinar a direção, velocidade e tempo de movimento do robô. Além disso, estruturas de controle, como comandos if/else e loops, permitem que o robô tome decisões rápidas com base nas informações dos sensores, como desviar ou atacar dependendo da proximidade do oponente.

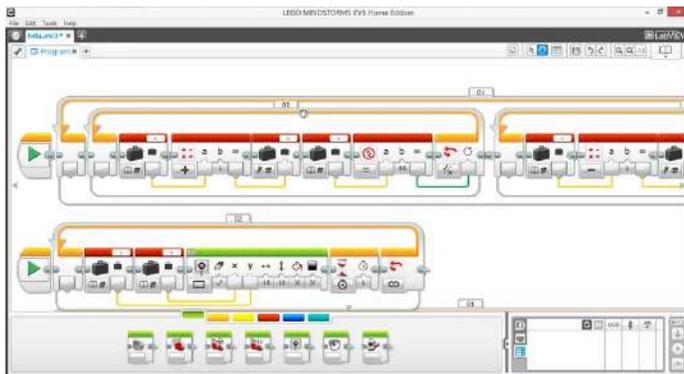


Fig. 4. Exemplo de programação em blocos no software LEGO Mindstorms EV3.

c.2) Programação em RobotC

Embora a programação com blocos seja simples e eficaz, o RobotC [6], uma linguagem baseada em C, oferece uma alternativa poderosa e eficiente para o desenvolvimento de robôs LEGO® EV3, especialmente em competições de sumô.

O RobotC proporciona maior controle sobre o hardware ??, permitindo um desempenho superior, com menos camadas de abstração e um controle mais direto sobre os sensores e motores.

O programador pode escrever códigos textuais, o que permite maior flexibilidade e reatividade do robô, essencial para competições de sumô, onde a velocidade de resposta é crucial.

O RobotC também oferece suporte nativo para controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo), uma técnica fundamental para garantir que os movimentos do robô sejam precisos e adaptáveis durante a competição.

A. Aplicações Gerais

a.1) Detecção do Adversário

Identificar com precisão a posição do adversário é crucial durante uma luta de Sumô LEGO®, permitindo que o robô execute ataques estratégicos de forma eficiente. Para isso, sensores ultrassônicos, sensores de toque e uma programação avançada são combinados, possibilitando que o robô navegue pelo Dojô de maneira controlada e precisa.

A maioria dos robôs utilizam dois sensores ultrassônicos, cujas medições são fundamentais para ajustar o controle dos motores. Isso garante movimentos estratégicos, como aproximações calculadas, ou evasivas rápidas.

a.2) Jogadas Estratégicas no Sumô LEGO®

Diferentes estratégias de combate impactam o desempenho de robôs no Sumô LEGO®, sendo o empurrão direto uma das jogadas mais comuns.

O empurrão direto é utilizado em robôs do tipo "aríete". Esses são projetados para aplicar força massiva, focando em empurrar ou tombar o oponente. Sua programação é otimizada para manter uma trajetória reta, garantindo impacto contínuo e dificultando a reação do adversário.

As jogadas dinâmicas são utilizadas em robôs mais rápidos ou com designs diferenciados que adotam estratégias ágeis, utilizando movimentos circulares ou em curva para atacar pelas laterais. Isso cria ângulos favoráveis e minimiza riscos, permitindo reposicionamentos rápidos e ataques eficazes. Essas jogadas, quando bem programadas, tornam o robô adaptável e competitivo, pronto para enfrentar os desafios do Sumô LEGO®.

B. Comparativo com NXT

O LEGO® EV3 foi criado para superar as limitações do NXT, oferecendo mais potência, recursos e flexibilidade.

A principal diferença entre eles está no desempenho. O EV3 tem um processador ARM9 de 300 MHz, bem mais rápido que o de 48 MHz do NXT. Ele também possui mais memória e armazenamento, permitindo projetos mais complexos. Além disso, o EV3 é mais versátil na conectividade, com Bluetooth, Wi-Fi e suporte a cartão SD, enquanto o NXT só tem Bluetooth.

Na programação, o EV3 é mais flexível, suportando o tradicional ambiente de blocos e também linguagens como Python e C, ideal para usuários avançados. O NXT usa o software NXT-G, que é mais simples e voltado para iniciantes.

Embora o EV3 seja mais avançado, o NXT ainda é útil, principalmente por seu custo mais baixo e simplicidade, sendo ideal para quem está começando na robótica.

Em resumo, o EV3 é melhor para projetos desafiadores, como competições de Sumô LEGO®, enquanto o NXT é uma boa escolha para educação básica e aprendizado inicial.



Fig. 5. EV3 e NXT.

C. Desafios no uso do controlador EV3

O controlador EV3 é central em muitos projetos de robótica, no entanto, dois desafios impactam sua adoção: o alto custo e o tempo de inicialização.

O EV3 se destaca pelo preço elevado, o que pode ser um obstáculo para escolas e programas educacionais com orçamentos limitados. Embora a qualidade do hardware justifique o custo, o valor do controlador, somado à necessidade de kits adicionais (sensores, motores e peças de reposição), pode restringir o acesso à tecnologia.

Outro problema é o tempo de inicialização, que pode levar de segundos a minutos para carregar o sistema operacional e conectar os dispositivos.

Para reduzir esses desafios, uma opção seria utilizar controladores mais acessíveis, que oferecem funcionalidades semelhantes. Além disso, melhorias no software para agilizar a inicialização poderiam tornar o EV3 mais eficiente em ambientes educacionais e competições de robótica.

V. CONCLUSÃO

A. Resultados Finais

A equipe RobotBulls tem se destacado nas competições de robótica no Brasil, graças ao aprimoramento contínuo da programação de seus robôs. A utilização eficiente dos controladores NXT e EV3 possibilita um controle preciso dos motores e sensores, fundamentais para garantir movimentos rápidos e estratégicos. A programação avançada é o diferencial que mantém a equipe no topo das competições, permitindo estratégias em tempo real, o que é crucial em um ambiente dinâmico como o das competições de Sumô LEGO®.

Ao longo de sua trajetória, a RobotBulls conquistou uma série de prêmios, destacando-se nas seguintes competições: 3º lugar na Copa Turing 2018; 1º lugar na Iron Cup 2020; 1º e 3º lugar na Iron Cup 2022; 1º, 2º e 3º lugar na Iron Cup 2024; 3º lugar na RCX 2024.

Esses resultados refletem o compromisso da equipe com a excelência, a dedicação ao desenvolvimento de técnicas avançadas e sua capacidade de inovar, consolidando sua posição de destaque no cenário nacional de robótica.

Conclui-se que a programação é o fator determinante para o sucesso de um robô de Sumô LEGO®, sendo o principal diferencial entre uma equipe vencedora e as demais. É por meio de algoritmos bem elaborados que o robô interpreta os dados

dos sensores, toma decisões rápidas e implementa estratégias eficazes durante a partida.

Controladores como o EV3 e o NXT exemplificam ferramentas que, quando combinadas com uma programação, permitem explorar todo o potencial dos motores e sensores.

REFERÊNCIAS

- [1] *História do Lego*. URL: <https://www.infoescola.com/curiosidades/lego/> (acesso em 30/11/2024).
- [2] RoboCore®. *Regras SUMÔ*. URL: https://www.robocore.net/upload/attachments/robocore_regras_sumo_165.pdf?srsId=AfmBOorESAhfExo86-7KBQRe6CPgcf4FmkchlXSBi636HV92A_gdCaU3 (acesso em 27/11/2024).
- [3] King Sun Fu, Rafael C Gonzalez, CS George Lee e Herbert Freeman. *Robotics: control, sensing, vision, and intelligence*. Vol. 1. McGraw-Hill New York, 1987.
- [4] LEGO®. *Guia do Usuário NXT 2.0*. URL: https://mediawiki.isr.tecnico.ulisboa.pt/images/a/a4/Midstorms_9797_LME_UserGuide.pdf (acesso em 28/11/2024).
- [5] LEGO®. *Guia do Usuário EV3*. URL: https://le-www-live-s.legocdn.com/sc/media/files/user-guides/ev3/ev3_user_guide_ptbr-239a9c0ea7115a07ad83d3ce7dff6773.pdf (acesso em 28/11/2024).
- [6] *Manual RobotC*. URL: <https://www.robotc.net/WebHelpMindstorms/index.htm> (acesso em 04/12/2024).

AGRADECIMENTOS À CATEGORIA SUMÔ LEGO®

As autoras gostariam de fazer um agradecimento especial a todos os integrantes da categoria do Sumô LEGO®, cujas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste artigo.

AUTORAS



Camila Aversani Alves é graduanda do 2º período do curso de Engenharia Elétrica no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). É integrante da equipe Robotbulls, atuando nas categorias Seguidor de Linha e Perseguidor de Linha. Atualmente, é bolsista de Iniciação Científica, contribuindo para projetos na categoria Sumô LEGO no Laboratório Robotbulls, além de ser membro ativo da equipe Seguidor de Linha.



Maria Fernanda Paula Castro é graduanda do 1º período de Engenharia de Controle e Automação no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Membro da equipe Robotbulls, tem se destacado nas categorias Seguidor de Linha e Perseguidor de Linha, além de atuar como bolsista de Iniciação Científica em projetos da categoria Sumô LEGO no Laboratório Robotbulls.

Estudo para Desenvolvimento de um Robô para a Categoria Sumô 3kg

Alexandre B. Lugli, Egidio R. Neto, Eugenio M. J. Silva, Luiz F. D. R. Santos, Matheus M. F. Gazzola, Silas R. O. Júnior, Wanderson E. Saldanha

Abstract— This study presents the development and implementation of a competitive 3 kg sumo robot named Excalibull, designed with a focus on torque and resilience for sumo competitions. Developed with high-power motors, a robust aluminum base, and a strategic sensor configuration, Excalibull operates in both autonomous and controlled modes. The robot incorporates a Bluetooth-enabled control system using a PS4 controller, as well as advanced detection and edge sensors for precise maneuvering within the dojo. The structural design, electronic components, and strategic configuration aim to enhance performance in intense, head-to-head battles.

Index Terms— Excalibull, robotics competition, sensor system, sumo robot, torque

Resumo— Este estudo apresenta o desenvolvimento e implementação do Excalibull, um robô competitivo da categoria de sumô 3 kg, projetado com foco em torque e resistência para competições de sumô. Equipado com motores de alta potência, base robusta em alumínio e configuração estratégica de sensores, o Excalibull opera nos modos autônomo e controlado. O robô possui sistema de controle por Bluetooth utilizando um controle de PlayStation 4 (PS4) e sensores avançados para detecção, garantindo precisão nas manobras dentro do dojo. O design estrutural, componentes eletrônicos e configuração estratégica foram desenvolvidos para aumentar o desempenho em combates intensos frente a frente.

Palavras Chave— Excalibull, competição de robótica, robô de sumô, sistema de sensores, torque

I. INTRODUÇÃO

A equipe de robótica RobotBulls é dedicada ao desenvolvimento de robôs de sumô para competições, que exigem o cumprimento de regras específicas e uma estratégia técnica eficiente. A categoria de robôs de sumô consiste em disputas em que dois robôs competem em uma arena circular, com o objetivo de empurrar ou imobilizar o oponente, respeitando restrições de peso e dimensões.



Fig. 1. Logotipo da Equipe RobotBulls

Toda a pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Robótica

e Inteligência Artificial do Inatel, que sedia a equipe RobotBulls[1]. O robô Excalibull foi projetado para atender aos requisitos da categoria, combinando resistência e desempenho, utilizando soluções tecnológicas adequadas para enfrentar os desafios das competições.

Este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento do Excalibull, detalhando as tecnologias e ferramentas utilizadas, os testes realizados e os resultados alcançados nas competições. Serão discutidas também as melhorias observadas durante o desenvolvimento e sugestões para trabalhos futuros.

II. REGRAS

O Sumo de Robôs é inspirado na arte marcial tradicional do sumô japonês, praticada entre duas pessoas em uma arena circular chamada dojo. Assim como no sumô humano, as batalhas de robôs ocorrem entre dois competidores em um dojo, e o objetivo é fazer com que o adversário toque o chão fora do dojo.

No Brasil, as regras podem variar entre torneios, mas, de forma geral, seguem as diretrizes do *All Japan Robot-Sumo Tournament (AJRST)*, considerado o torneio com maior relevância campeonato mundial nesta modalidade[2].

A. Arena

Na categoria Sumô de 3 kg, o dojo tem 1,54 m de diâmetro e 5 mm de espessura, feito de ferro[3].

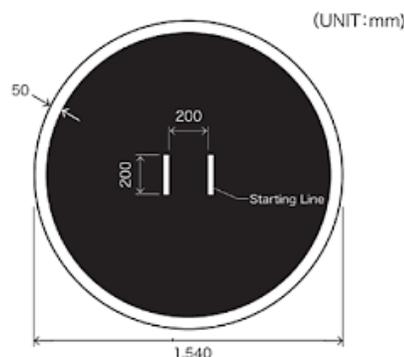


Fig. 2. Dojô 3 Kg

No centro do dojo existem duas linhas paralelas chamadas linhas *shikiri*, que delimitam as áreas de posicionamento dos robôs antes do início da partida. Essas linhas devem ser pintadas em uma cor escura (como marrom) para evitar que sejam detectadas por sensores de refletância dos robôs. No Sumô de 3 kg, as linhas medem 2 cm de largura por 20 cm de comprimento[3].

Na extremidade do dojo, encontra-se uma linha branca chamada *tawara*, que marca os limites da arena. A *tawara* possui 5 cm no Sumô de 3 kg[3].

B. Robôs

Os robôs de sumô não podem ser equipados com armas ou dispositivos que tenham como objetivo danificar o adversário ou interferir no funcionamento dos sensores ou do robô oponente [3].

Cada categoria possui limitações específicas:

Sumô de 3 kg: O peso máximo permitido é de 3 kg, com dimensões limitadas a 20 cm de largura e comprimento. Embora não existam restrições de peças, recomenda-se o uso de ímãs na base para aumentar a aderência ao solo do dojo. Esta categoria também é dividida em duas subcategorias:

- Sumô de 3 kg Auto: Robôs totalmente autônomos.
- Sumô de 3 kg RC: Robôs controlados por rádio, com um operador [3].

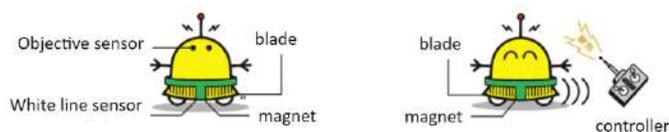


Fig. 3. Forma autônoma e Rádio controlada

C. Disputas

As disputas de sumô de robôs consistem em até três *rounds*, sendo declarado vencedor o competidor que vencer dois *rounds*. Cada *round* termina quando um dos robôs toca o chão fora dos limites do dojo, como ilustrado na Figura 3 [3].

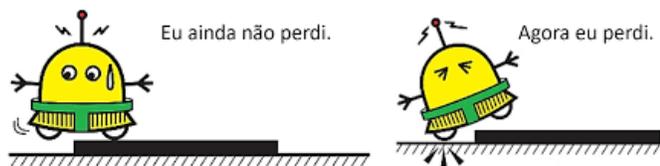


Fig. 4. Derrota [2]

Nos intervalos entre *rounds*, não são permitidas alterações significativas nos robôs, como troca de peças ou modificações no código. No entanto, ajustes menores, como apertar parafusos ou selecionar estratégias previamente programadas, são permitidos [3].

No início de cada *round*, os robôs devem ser posicionados simultaneamente no dojo, dentro da área entre a linha *shikiri* e a *tawara*. Se uma equipe atrasar o posicionamento, recebe uma advertência. O início da partida é sinalizado pelo juiz, e movimentos antes desse sinal também resultam em advertências. Ao acumular duas advertências, a equipe infratora perde o *round* [3].

Caso um *round* se prolongue excessivamente, o juiz pode declarar empate. Em caso de sucessivos empates, o juiz pode iniciar novos rounds ou, se necessário, declarar um vencedor com base em critérios predefinidos [3].

III. ESTRUTURA MECÂNICA E COMPONENTES

A estrutura mecânica do Excalibull é construída para suportar combates frontais com outros robôs de alta potência, sendo robusta o suficiente para resistir aos empurrões intensos e ágil para

manobrar no dojo. Os principais aspectos do design mecânico incluem:

A. Base de Alumínio

A escolha do alumínio 6065, um material não magnético, foi baseada na sua resistência e leveza, sendo um diferencial comparado ao uso de fibra de carbono, que não oferecia a rigidez necessária para suportar o peso do robô. Na base, são fixados ímãs de neodímio [4] estrategicamente posicionados para garantir maior aderência ao dojo, essencial em combates intensos.

B. Distribuição de Ímãs

O robô Excalibull foi confeccionado utilizando 14 ímãs de dois furos e 9 ímãs de um furo na base, além de 7 ímãs de dois furos e 5 de um furo no suporte da lâmina. Os modelos escolhidos foram o BX082CS-S-N52, com uma força de tração de 11,03 libras, e o BC82CS-N-N52, com 8,83 libras. A distribuição estratégica e a potência de atração desses ímãs maximizam a aderência do robô ao dojo, evitando derrapagens em situações de alta pressão e permitindo o uso completo do torque. [4]

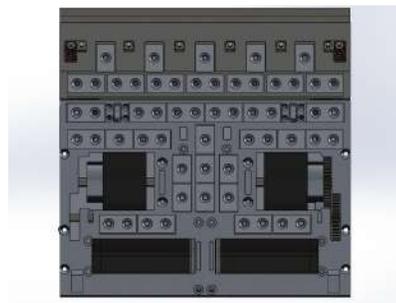


Fig. 5. Ímãs

C. Sistema de Lâmina Móvel

O Excalibull possui um suporte de lâmina móvel, que evita que o robô seja completamente levantado ao enfrentar oponentes frontais. Esse *design* previne que o robô perca contato com o solo, o que poderia comprometer a tração e a força de ataque.

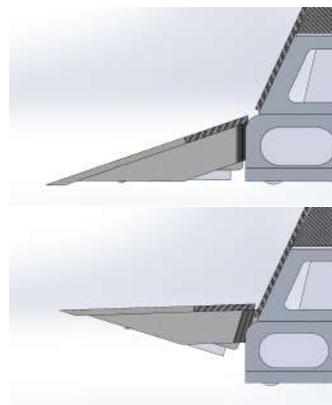


Fig. 6. Figura com a Lâmina Móvel

D. Sistema de Camadas

A estrutura do robô foi dividida em duas camadas: a inferior para os componentes mecânicos e a superior para os componentes eletrônicos, separadas por um mancal de fibra de carbono. O

mancal, além de ser leve e resistente, ajuda a isolar e proteger os circuitos de possíveis danos durante o combate.

E. Fixação de Componentes

As baterias são fixadas por velcro para evitar deslocamento durante o combate, e os microcontroladores e o driver Roboclaw são montados com parafusos, garantindo estabilidade e segurança.

IV. COMPONENTES ELETRÔNICOS E SISTEMA DE CONTROLE

O Excalibull incorpora uma eletrônica avançada para maximizar a eficiência e precisão de controle em ambos os modos de operação (controlado e autônomo):

A. Motor e Redução

Utilizando os motores Maxon RE40[5] e uma redução de 1:10,71 com engrenagens da JSumo[6], o Excalibull possui um foco em torque, permitindo empurrões poderosos contra o adversário. As rodas de 30x40 mm contribuem para a estabilidade e tração necessária ao dojo.



Fig. 7. Motor Maxon RE40

B. Driver Roboclaw 2x60AHV

Esse driver de alto desempenho é capaz de suportar até 12S de bateria, ideal para controlar a potência dos motores, que exigem uma alta capacidade de resposta e resistência durante o combate.[7]

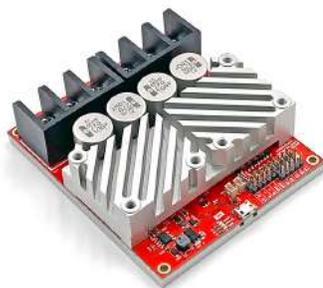


Fig. 8. RoboClaw 2x60AHV

C. Baterias

Para manter o desempenho consistente, o robô é alimentado por duas baterias 6S LiPo de 1050mAh e 130c da marca Tattu, oferecendo a tensão e corrente adequadas para suportar as demandas dos motores e do driver.



Fig. 9. Bateria

D. Sistema de Controle

O robô utiliza um microcontrolador *Blackpill* e um módulo ESP32WROOM para conectar-se ao controle de *PlayStation 4* via *Bluetooth*, possibilitando operação controlada. No modo autônomo, as jogadas são programadas através de um comando de 3 bits que especifica a direção e a ação desejada (por exemplo, E02 para "Jogada 2 à Esquerda" ou D10 para "Jogada 10 à Direita"). Esse sistema permite que, após o comando do juiz [8], o robô execute ações estratégicas predefinidas.

E. Sensores

O Excalibull utiliza uma configuração avançada de sensores para detecção do adversário e da borda do dojo. O robô emprega cinco sensores Panasonic cx422-n da marca Sense[9, 10], estrategicamente angulados para convergirem em um ponto central, permitindo precisão em ataques diretos. Além disso, dois sensores de linha abaixo da lâmina detectam a borda branca ao redor do dojo, acionando uma interrupção no sistema para evitar que o robô saia dos limites do dojo. A disposição e configuração dos sensores foram otimizadas com base nas diretrizes apresentadas no *Sumo Robot Black Book (2017)*[11], um manual abrangente com dicas e táticas específicas para robôs de sumô.



Fig. 10. Sensor Panasonic

V. RESULTADOS OBTIDOS

O desenvolvimento do robô de sumô de 3 kg Excalibull apresentou resultados expressivos em combate, destacando sua robustez e eficiência em diferentes cenários. A combinação de motores com alta redução, rodas de alta aderência e ímãs de neodímio permitiu que o robô se destacasse em força e tração.

Durante os testes, o Excalibull enfrentou o Bullbasauo, outro robô de 3 kg da mesma equipe. No confronto, o Excalibull

superou o Bullbasauro em força, mas mostrou uma velocidade inferior: enquanto o Bullbasauro alcançava 5,53 m/s, o Excalibull mantinha uma média de 4,21 m/s. Apesar disso, a estratégia de priorizar torque e controle se mostrou eficaz, garantindo a vitória em combates prolongados.

Outro teste significativo explorou a eficiência da lâmina móvel do Excalibull. Mesmo em situações em que o robô foi rampado (situação em que a lâmina do adversário se posiciona sob a base do robô e aplica força ascendente, desestabilizando-o) pelo adversário, a lâmina ajustável impediu que ele perdesse a batalha. A capacidade de se reposicionar após ser levantado revelou o valor dessa solução mecânica para mitigar estratégias comuns de oponentes mais ágeis.

Além disso, os sensores Panasonic, utilizados exclusivamente para a detecção de adversários, tiveram um desempenho excepcional em localizar rapidamente robôs concorrentes, garantindo uma resposta ágil e estratégica.

Apesar das limitações de velocidade, o Excalibull provou ser um robô resiliente, destacando-se em cenários de força e resistência. Sua performance sólida demonstra o potencial do *design* e das soluções aplicadas, oferecendo uma base promissora para avanços futuros e para o aprendizado prático em engenharia robótica.

VI. CONCLUSÃO

Competições de robótica são um ambiente propício para o desenvolvimento e a validação de sistemas inovadores e avançados, destacando-se também como um espaço enriquecedor para aprendizado e troca de conhecimentos. Esses eventos incentivam a aplicação prática de conceitos teóricos, promovendo a integração de áreas como engenharia mecânica, eletrônica e computação.



Fig. 11. EXCALIBULL

Dentro desse contexto, o robô de sumô de 3 kg Excalibull representa um exemplo robusto de engenharia aplicada, combinando eficiência mecânica, potência eletrônica e controle de *software* para atingir alta competitividade. A equipe RobotBulls desenvolveu o Excalibull com foco em torque, resistência e adaptabilidade, priorizando a utilização de componentes de ponta e soluções inteligentes, como sensores estratégicos e aderência magnética para o dojo.

O processo de desenvolvimento do Excalibull evidenciou a importância de uma abordagem interdisciplinar para alcançar precisão, desempenho e confiabilidade em robôs destinados a competições. Ao mesmo tempo, o projeto serviu como uma ferramenta de aprendizado, permitindo o teste e a integração de novas tecnologias, como o controle via Bluetooth e a utilização de microcontroladores ESP para sistemas autônomos e controlados remotamente.

O Excalibull simboliza o potencial transformador da robótica em competições. Ele reforça a relevância de projetos desafiadores no desenvolvimento de habilidades práticas e no estímulo à criatividade, preparando os participantes para lidar com desafios complexos de forma colaborativa e inovadora. Por meio de competições, a robótica se firma como uma ferramenta indispensável para moldar o futuro da engenharia e fomentar a conexão entre tecnologia e sociedade.

REFERÊNCIAS

- [1] Inatel. *Robótica - Inatel*. URL: <https://inatel.br/robotica/> (acesso em 07/11/2024).
- [2] Fujisoft. *All Japan Robot-Sumo Tournament*. URL: <https://www.fsi.co.jp/sumo/robot/en/index.html> (acesso em 19/11/2024).
- [3] Fujisoft. *All Japan Robot Sumo Tournament Official Regulation*. URL: <https://www.fsi.co.jp/sumo/robot/en/rule.html> (acesso em 19/11/2024).
- [4] K&J Magnetics. *Neodymium Magnets Specifications BX082CS-S-N52 and BC82CS-N-N52*. URL: <https://www.kjmagmetics.com> (acesso em 30/10/2024).
- [5] Maxon Motors. *DC motor RE40 technical specifications*. URL: <https://www.maxongroup.com/re40> (acesso em 30/10/2024).
- [6] JSumo Robotics. *JSumo Sumo Robot Parts - Gears and Wheels*. URL: <https://www.jsumo.com> (acesso em 30/10/2024).
- [7] BasicMicro. *RoboClaw Motor Controllers - Product Information*. URL: <https://www.basicmicro.com> (acesso em 30/10/2024).
- [8] Robocore. *Regras de Competições de Robôs de Sumô*. 2019. URL: https://www.robocore.net/upload/attachments/regras_sumo_ajrst_2019_pt_197.pdf?srsltid=AfmB0oqGEp-P-wLATX1O4RV9V1l67vcSEmBWdzwbFrF64Fp65Vgw1BG (acesso em 30/10/2024).
- [9] Panasonic Corporation. *Panasonic Industrial Sensors - Datasheet*. URL: <https://industrial.panasonic.com> (acesso em 30/10/2024).
- [10] Sense. *Sensores Industriais*. URL: <https://www.sense.com.br/siter> (acesso em 07/11/2024).
- [11] JSumo. *Sumo Robot Black Book: Tips and Tactics for Better Sumo Robots*. JSumo, abr. de 2017. URL: <https://www.jsumo.com/sumo-robot-blackbook-pdf-ebook-tips-tactics-for-better-sumo-robots> (acesso em 30/10/2024).

Proposta de Implementação de Lidar para Robôs Autônomos Trekking

Mayara do Prado Almeida e Tobias Bueno Pereira

Alexandre Baratella Lugli, Egídio Raimundo Neto, Eugênio Moreira Jonas da Silva, Wanderson Eleutério Saldanha
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

Abstract—The National Institute of Telecommunications (INATEL), through its undergraduate courses, relies on the support of the areas of Control and Automation Engineering and Electrical Engineering to consolidate its robotics team, known as "RobotBulls."

This team, which was formed 11 years ago, participates in various competitions, including the Trekking category. In this category, a circuit is proposed for the robot, which must traverse it in the shortest time possible, completely autonomously.

This article aims to present the efforts of the team members in improving the robot's field recognition through the "lidar" device, with a view to optimizing its performance in competitions.

Index Terms—Competition, Lidar, Robot, Trekking

Resumo—O Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), por meio de seus cursos de graduação, conta com o suporte das áreas de Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Elétrica para consolidar sua equipe de robótica, conhecida como "RobotBulls".

A referida equipe, que foi formada há 11 anos, participa de diversas competições, incluindo a modalidade Trekking. Nessa categoria, um circuito é proposto ao robô, que deve percorrê-lo no menor tempo possível, de forma completamente autônoma.

Este artigo tem como objetivo apresentar os esforços dos integrantes da equipe no aprimoramento do reconhecimento de campo do robô por meio do dispositivo "lidar", com vistas a otimizar seu desempenho nas competições.

Palavras chave—Competição, Lidar, Robô, Trekking.

A modalidade Robô Trekking foi pensada para estimular o desenvolvimento de veículos autônomos de alto desempenho, que utilizam tecnologias avançadas como inteligência artificial, visão computacional, e sensoriamento espacial, com o intuito de criar robôs que operem de forma completamente independente. Cada robô participante da competição deve funcionar sem qualquer tipo de controle manual ou assistência externa, seja por fio ou rádio. A única exceção permitida é o sistema de failsafe, que deve ser acionado apenas pelo juiz em situações de emergência, como falhas mecânicas ou riscos iminentes de segurança. Esse sistema sem fio serve como uma medida de segurança para interromper automaticamente o robô quando necessário, interrompendo seu funcionamento para evitar danos a si mesmo ou aos outros participantes.

No que tange às características físicas do robô, ele deve ser projetado de forma que atenda aos critérios técnicos estabelecidos. O tamanho máximo do robô é limitado a 500x500x500 mm, e ele não pode apresentar componentes que ofereçam riscos aos outros veículos ou competidores, como pontas afiadas ou arestas cortantes. Para garantir a segurança e a conformidade com essas especificações, cada robô passará por uma inspeção detalhada feita pelos juizes antes do início da competição. Caso sejam detectadas alterações no robô que o descaracterizem em relação ao projeto original, o participante será desclassificado da competição.

O campo de competição poderá ser tanto interno quanto externo, adaptando-se a diferentes condições e desafiando os robôs a superarem uma grande diversidade de obstáculos. Esses obstáculos podem incluir rampas, desníveis, buracos e, em competições ao ar livre, até mesmo condições climáticas adversas. O robô deverá navegar de forma autônoma pelo percurso, passando por quatro marcos de controle dispostos de maneira aleatória no campo. O robô deverá passar por esses marcos em ordem sequencial, começando pelo primeiro e seguindo até o quarto, ativando um sistema luminoso que ficará visível por até dois segundos a cada passagem. Este sistema serve como um indicador claro de que o robô completou cada etapa do percurso com sucesso.

Além das passagens obrigatórias, o campo poderá contar com passagens opcionais, que oferecem bonificação ao robô por tempo reduzido. Cada passagem opcional é acompanhada de um multiplicador de tempo, variando entre 0.1 e 0.9, dependendo de sua dificuldade ou localização. Passar por essas passagens pode reduzir o tempo final do robô na competição, mas cada passagem pode ser usada apenas uma vez, e a

I. INTRODUÇÃO



Fig. 1. Logo da equipe Robotbulls

Entenda a partida e as regras.

bonificação será aplicada de forma cumulativa, o que exige um planejamento estratégico da equipe para obter o melhor tempo possível sem comprometer a capacidade do robô de completar todo o percurso.

A competição se desenvolve em torno de tomadas de tempo rigorosamente cronometradas. Cada robô tem direito a três tentativas de completar o percurso por dia, com as tentativas sendo feitas consecutivamente. Durante a tomada de tempo, o robô deve percorrer todo o trajeto até o marco final em um tempo inferior a 10 minutos. O cronômetro será iniciado assim que o robô for colocado no campo e só será parado quando o robô atingir o marco final, ativando o dispositivo luminoso. Caso o robô se mova para fora do campo, colida com os limites da arena ou não consiga superar algum obstáculo, a tentativa será considerada inválida e o tempo será registrado até o último marco alcançado.

Outro aspecto importante da competição é a documentação técnica que as equipes devem apresentar. As equipes que ocuparem as três primeiras colocações devem submeter um fluxograma simplificado que descreva a lógica de funcionamento do robô, incluindo suas decisões autônomas, navegação e estratégias adotadas durante o percurso. Esse fluxograma não precisa detalhar a parte física do robô, mas deve ser claro o suficiente para que os juízes possam compreender como o robô realiza seu trajeto e toma decisões. Caso o fluxograma não seja considerado adequado, a equipe terá que revisá-lo e enviar uma versão corrigida. A falta de um fluxograma válido levará à desclassificação automática da equipe.

Quanto à classificação, o critério principal é o tempo mais rápido que o robô leva para completar o percurso até o marco final. Caso mais de um robô não consiga completar todos os marcos, o critério será o tempo até o marco 3, depois o tempo até o marco 2, e assim por diante, respeitando a ordem de alcance dos marcos. No entanto, para ser elegível à premiação, o robô deve ter completado, no mínimo, até o marco 2. Os robôs que não completarem pelo menos dois marcos não poderão ser premiados, independentemente de seu desempenho no restante do percurso.

Durante as tomadas de tempo, o campo de competição será restrito a uma equipe de cada vez, e apenas um membro da equipe poderá ficar na área da pista. Este membro deve permanecer a uma distância mínima de 3 metros do robô, garantindo que não haja interferência durante o processo de competição. As tomadas de tempo serão rigorosamente controladas, com uma tolerância de 30 segundos após a sinalização do juiz para que o robô comece a se mover. Caso o robô não inicie sua ação dentro desse intervalo, será penalizado com um false start, o que acarretará uma desclassificação da tentativa e uma possível penalização no tempo total.

Em resumo, a modalidade Robô Trekking não só proporciona um espaço para o aprimoramento das tecnologias relacionadas à robótica autônoma, mas também desafia as equipes a desenvolverem soluções inovadoras, capazes de atender aos critérios técnicos e superar obstáculos com agilidade e precisão.



Fig. 2. Robô Bullratela

II. O ROBÔ:

A. Funcionamento

O robô funciona de maneira totalmente autônoma, com uma integração precisa entre seus diversos componentes. O Arduino Nano serve como o cérebro do sistema, processando dados em tempo real e executando algoritmos que orientam todas as operações. Ele recebe informações dos sensores e da Jetson, que é responsável por fornecer à máquina a capacidade de perceber o ambiente e tomar decisões inteligentes, como localizar cones de sinalização. Com base nesses dados, o Arduino ajusta, de forma meticulosa, o ângulo do servo motor, guiando o robô de maneira eficiente e precisa para alcançar seus objetivos.

B. Controle

A estabilidade do robô é mantida por um conjunto de sensores, entre eles o MPU, que monitora a posição e os ângulos de inclinação. Esses dados são essenciais para que o sistema tome decisões dinâmicas, ajustando constantemente o equilíbrio e a trajetória. O ESC regula a velocidade e a direção do motor, permitindo que o robô se movimente de forma ágil e precisa, enquanto os encoders nos eixos das rodas fornecem informações cruciais sobre a distância percorrida, permitindo ajustes em tempo real na navegação.

C. Eletrônica

A gestão da energia do robô é outro ponto de destaque. Os módulos Step-down e Step-up garantem que a tensão seja ajustada de acordo com as necessidades de cada componente. O step-down reduz a tensão para alimentar a Jetson, enquanto o step-up eleva a voltagem quando necessário para alimentar sistemas como o motor indutivo, assegurando que todos os componentes recebam a energia adequada.

Em todo esse processo, o buzzer oferece uma confirmação auditiva de que o robô está em funcionamento, enquanto o fusível atua como um mecanismo de proteção, evitando danos aos componentes em caso de sobrecarga elétrica. Assim, cada elemento do robô, de sua inteligência artificial à regulação energética, trabalha de forma harmônica, possibilitando que ele realize suas tarefas de maneira autônoma, estável e eficiente.

O resultado é um sistema ágil, inteligente e perfeitamente equilibrado, capaz de navegar e interagir com seu ambiente de maneira dinâmica e precisa.

D. Processamento em tempo real

O robô foi projetado para operar em tempo real, realizando ajustes contínuos à medida que recebe novos dados. Sua capacidade de auto-correção, alimentada pela interação entre os sensores e a inteligência artificial da Jetson, garante que ele responda rapidamente às mudanças no ambiente, como obstáculos inesperados ou variações na superfície. Esse ciclo constante de feedback e ajuste permite que o robô não apenas execute suas tarefas com alta precisão, mas também aprenda e se adapte a novas condições, refletindo a combinação ideal entre hardware robusto e software inteligente.

III. LIDAR

O LIDAR A1 é um sensor de varredura a laser bidimensional (2D) utilizado para a captura de dados de distância e mapeamento em duas dimensões. Ele emite pulsos de laser que, ao atingir os objetos no ambiente, são refletidos de volta ao sensor, permitindo a medição da distância e a geração de um perfil detalhado da superfície. Embora não forneça informações tridimensionais, o LIDAR A1 é altamente eficaz em aplicações que exigem mapeamento e detecção em 2D [1], como o monitoramento de superfícies, a detecção de obstáculos em trajetórias planas e a criação de mapas bidimensionais de alta precisão. A tecnologia é comumente utilizada em áreas como navegação autônoma, robótica e monitoramento de terrenos.

A. Objetivo do Lidar no Trekking

Em ambientes internos, o LIDAR tem a função de fornecer uma percepção detalhada e em tempo real do espaço ao redor do veículo, permitindo que ele construa um mapa preciso de seu ambiente. O LIDAR é uma excelente escolha devido à sua alta precisão na medição de distâncias e capacidade de gerar uma "nuvem de pontos" 3D, que pode ser utilizada para identificar obstáculos e mapear o ambiente com alta resolução.

No caso de veículos autônomos realizando trekking indoor, o LIDAR é fundamental para detectar paredes, móveis, obstáculos móveis e outras características importantes do ambiente. A navegação precisa é necessária para que o veículo se mova por corredores, evite obstáculos e siga trajetórias predefinidas sem colidir.

B. Sistema de Mapeamento com RViz

O RViz (sistema utilizado) permite que os usuários visualizem, em tempo real, os dados gerados durante o mapeamento, incluindo as nuvens de pontos provenientes de sensores como LIDAR ou câmeras RGB-D, além dos mapas construídos por algoritmos de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [2]. No entanto, enquanto o RViz exibe esses dados, ele também revela as imperfeições e erros que podem surgir durante o processo de mapeamento, tornando evidente a complexidade do processo.

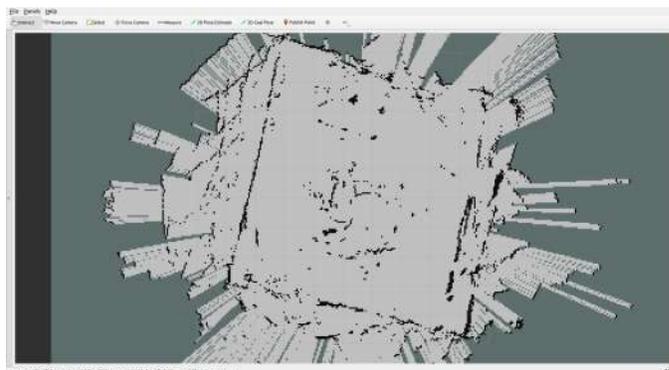


Fig. 3. Mapeamento com Lidar

C. Tentativa de utilizar o Lidar com python

Para comunicar-se com o LIDAR A1, será utilizado a biblioteca pyserial, que permite ler os dados do sensor por meio de uma porta serial. Os dados que o LIDAR envia são valores de distância que representam a posição dos objetos ao redor do sensor. [3]

D. Explicação do Código

Conexão com o LIDAR A1: O código utiliza a biblioteca pyserial para se comunicar com o LIDAR A1 via porta serial (USB). A porta serial e a taxa de comunicação devem ser configuradas corretamente (no exemplo, utilizamos /dev/ttyUSB0 e 115200 baud).

E. Leitura dos Dados

A função lerdadoslidar() é responsável por ler os dados enviados pelo LIDAR. Cada leitura de dados retorna uma distância, que é o valor da distância medida até o objeto mais próximo.

F. Detecção de Obstáculos

Uma função para coleta dados de distância do LIDAR e verifica se algum valor de distância está abaixo de um limite predefinido (1 metro). Se a distância for inferior ao limite, o ponto é considerado um obstáculo.

G. Visualização dos Dados

O código utiliza a biblioteca matplotlib para gerar um gráfico polar, onde os valores de distância são exibidos em relação ao ângulo de varredura.

IV. CONCLUSÃO

O Lidar A1, quando integrado a robôs trekking, oferece vantagens significativas, mas também apresenta limitações que, no contexto deste projeto específico, tornaram sua utilização inviável. Sua principal vantagem é a impressionante precisão e resolução, permitindo ao robô mapear e perceber o ambiente com uma riqueza de detalhes impressionante. Com seu alcance e capacidade de cobertura em 360°, o Lidar A1 é fundamental para a navegação em terrenos desafiadores, como florestas densas ou trilhas rochosas, onde a detecção de obstáculos é crucial. Em ambientes com pouca luminosidade ou alto contraste, o Lidar A1 se destaca pela sua eficácia, proporcionando ao robô uma percepção detalhada e confiável de seu entorno.

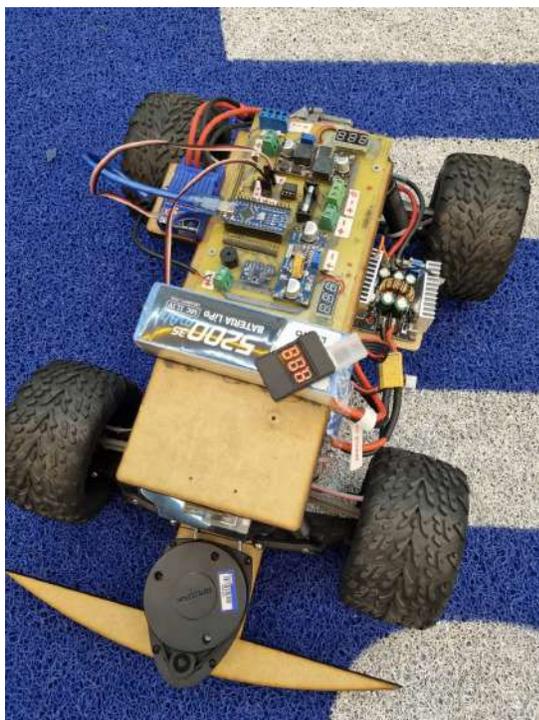


Fig. 4. Bullratela com Lidar

O Lidar A1 oferece vantagens no mapeamento 3D, melhorando o planejamento de rotas e a segurança do robô ao evitar colisões. No entanto, a grande quantidade de dados gerados exige alto poder de processamento, o que representa um desafio para robôs trekking, pois demanda sistemas mais robustos e consome mais energia, afetando a autonomia e a eficiência.

Além disso, o Lidar A1 enfrenta dificuldades consideráveis em ambientes outdoor, onde a luz solar interfere diretamente no seu funcionamento. Como o Lidar utiliza lasers para mapear o ambiente, a intensidade da luz solar pode afetar a precisão e a qualidade dos dados gerados, especialmente em ambientes externos, como florestas ou áreas abertas com alta exposição à luz direta. A luz solar intensa pode distorcer os feixes de laser, resultando em medições erradas ou na perda de informações importantes, o que afeta negativamente a capacidade do robô de detectar obstáculos e manter uma navegação segura e eficiente.

Esses fatores combinados — a imprecisão na detecção de objetos, a interferência da luz solar e a complexidade no tratamento de dados — tornam o Lidar A1 uma escolha inadequada para robôs trekking, especialmente em ambientes externos dinâmicos e exigentes. Para garantir uma navegação eficiente, precisa e autônoma, é necessário explorar alternativas de sensores mais adequados às condições de operação, com maior robustez em diferentes tipos de terreno e com menor demanda computacional.

A. Agradecimentos especiais dos autores para a equipe Trekking

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos a toda a equipe, Miguel José Abdala Ribeiro e Gabriel Mendonça Gonçalves, que ensinaram o que é o Trekking. A colaboração mútua e o empenho demonstrado durante o processo de ensinamento e aprendizagem foram essenciais para

a conclusão bem-sucedida deste projeto. Agradecemos imensamente pelo esforço, pelas valiosas ideias compartilhadas e pelo compromisso de todos em alcançar os objetivos propostos. Trabalhar juntos na equipe é uma experiência gratificante, e somos gratos por cada contribuição.



Fig. 5. Logo da equipe Robotbulls

REFERÊNCIAS

- [1] Jie Yu, Ao Zhang e Yong Zhong. “An Indoor Mobile Robot 2D Lidar Mapping Based on Cartographer-Slam Algorithm”. Em: *Taiwan Ubiquitous Inf 7* (2022), pp. 795–804.
- [2] Adriaan Jacobus Prins e Adriaan Van Niekerk. “Crop type mapping using LiDAR, Sentinel-2 and aerial imagery with machine learning algorithms”. Em: *Geo-Spatial Information Science 24.2* (2021), pp. 215–227.
- [3] Fatma Zohra Ouamane, Foudil Cherif, Bouthaina Allia e Baya Lina Menai. “Accurate and Dynamic Environment Modeling: Cost-effective Alternatives to 3D LiDAR”. Em: *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)*. Vol. 1. IEEE, 2023, pp. 1–5.

AUTORES

Mayara do Prado Almeida é graduanda em Engenharia de Elétrica no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e faz parte da equipe de Robótica Robotbulls, na qual é integrante da modalidade Trekking, há 9 meses.



Tobias Bueno Pereira é graduando em Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e faz parte da equipe de Robótica Robotbulls, na qual é capitão da modalidade Trekking, há 2 anos.



Desenho e implementação de uma prótese de mão servo-atuada em impressora 3D FDM

Marco Fabian Borda Wiegert, Dany Lileth Ferrufino Machado, Brian Arauco Paniagua
Universidad Privada del Valle - UNIVALLE

marcofabianbordawiegert@gmail.com, fmd2019446@est.univalle.edu, apb2019606@est.univalle.edu
<https://orcid.org/0009-0003-8457-4625>, <https://orcid.org/0009-0008-4917-1149>, <https://orcid.org/0009-0005-7607-6604>

Abstract—This article provides a guide for the design, printing, and assembly of a 3D servo-actuated hand prosthesis using accessible tools like Tinkercad and a FDM 3D printer. The goal is to democratize access to this technology by offering a simple approach for users with no prior experience in 3D modeling or printing. The prosthesis, designed without joint connections, simplifies its manufacturing, though it limits its functionality compared to more complex designs. Affordable materials, such as elastic bands and flexor cables, were used to mimic tendons and ligaments. Functional tests showed that it performs basic movements like flexion, extension, and gripping objects, although it has limitations with heavier objects. It is concluded that this prosthesis is a viable option for educational applications or as a starting point for more advanced designs, promoting innovation in 3D prosthetics, especially in resource-limited regions.

Index Terms—3D printing, Accessible design, Hand prosthesis, Servo Motors

Resumo—Este artigo apresenta um guia para o projeto, impressão e montagem de uma prótese de mão 3D servo-atuada, utilizando ferramentas acessíveis como o Tinkercad e uma impressora 3D FDM. O objetivo é democratizar o acesso a essa tecnologia, oferecendo uma abordagem simples para usuários sem experiência em modelagem ou impressão 3D. A prótese, projetada sem conexões articulares, simplifica sua fabricação, embora limite sua funcionalidade em comparação com projetos mais complexos. Foram utilizados materiais de baixo custo, como elásticos e cabos flexores, que imitam tendões e ligamentos. Os testes funcionais demonstraram que a prótese realiza movimentos básicos, como flexão, extensão e apreensão de objetos, embora apresente limitações com objetos pesados. Conclui-se que essa prótese é uma opção viável para aplicações educacionais ou como base para projetos mais avançados, promovendo a inovação no campo de próteses 3D, especialmente em regiões com recursos limitados.

Palavras chave—Design acessível, Impressão 3D, Prótese de Mão, Servomotores

I. INTRODUÇÃO

Uma prótese é um dispositivo artificial projetado para substituir a função de uma parte do corpo que foi perdida, dotado de certa autonomia e inteligência para replicar movimentos e funcionalidades [1]. Graças a esses dispositivos, pessoas que sofreram amputações podem recuperar parte de sua funcionalidade e até mesmo realizar atividades complexas, como escalar montanhas ou praticar esportes radicais [2]. A história das próteses remonta aos antigos egípcios, que utilizavam materiais como fibras para criar dispositivos que proporcionassem uma sensação de completude. Com o tempo, a tecnologia protética avançou significativamente, passando de designs básicos para sistemas mais sofisticados que incorporam sensores de eletromiografia (EMG), microprocessadores e articulações motorizadas [3]. No

entanto, apesar desses avanços, as próteses comerciais ainda são caras e de difícil acesso em países em desenvolvimento, como a Bolívia, onde os recursos econômicos e tecnológicos são limitados.

Uma alternativa promissora às próteses tradicionais são as próteses modeladas e impressas em 3D, que oferecem uma solução mais econômica e acessível. Essa tecnologia permite fabricar desde designs simples até próteses altamente personalizadas e complexas. No entanto, muitos dos recursos disponíveis online para a criação de próteses 3D costumam ser tecnicamente complexos e difíceis de seguir para pessoas sem experiência em modelagem ou impressão 3D. Isso gera a necessidade de um recurso educacional claro e acessível que oriente estudantes, profissionais e entusiastas no projeto e fabricação de próteses 3D sem exigir conhecimentos avançados.

Entre os diversos tipos de próteses, as de mão são particularmente importantes devido à complexidade e utilidade dessa extremidade. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que milhões de pessoas no mundo sofreram amputações de braço ou mão, e uma grande parte delas reside em países em desenvolvimento, como a Bolívia, onde os recursos econômicos e tecnológicos são limitados [4]. Isso ressalta a necessidade de soluções protéticas acessíveis e econômicas nessas regiões. Este artigo fornece um guia passo a passo para o design, impressão e montagem de uma prótese de mão 3D servo-atuada, utilizando ferramentas e softwares acessíveis, como o Tinkercad e uma impressora 3D FDM. Seu objetivo é oferecer uma solução prática e replicável, inspirando estudantes, profissionais e entusiastas a desenvolverem seus próprios designs, democratizando o acesso à tecnologia protética e fomentando a inovação na engenharia biomédica e na impressão 3D.

II. METODOLOGIA

A. Estudo da anatomia e funcionalidade da mão

Antes de projetar a prótese, realizou-se uma pesquisa sobre a anatomia e funcionalidade da mão humana para compreender sua estrutura e movimentos. Estudou-se a composição óssea, muscular, tendinosa e ligamentosa, bem como sua capacidade de realizar tarefas complexas, como agarrar, mover e manipular objetos de diferentes tamanhos. Essas informações foram resumidas de forma clara e simples para fornecer ao leitor os conceitos essenciais necessários antes de abordar o projeto da prótese.

B. Definição das características da prótese de mão

O objetivo da prótese é substituir uma extremidade ausente e replicar sua funcionalidade. Foi projetada uma prótese de mão funcional capaz de agarrar objetos, com foco na simplicidade de design e implementação. Optou-se por uma prótese elétrica ativada com servomotores, pertencente ao grupo de próteses funcionais [5].

A prótese consiste em uma palma da mão com cinco dedos. Não foram utilizados conectores de articulação entre as falanges, mas sim elásticos para manter os dedos em posição estendida por padrão [6]. Na parte posterior da palma, foi colocado um suporte com cinco servomotores, conectados aos dedos por meio de fios que percorrem canais internos na palma e nas falanges.

Para facilitar sua caracterização, a prótese foi dividida em três partes principais:

- *Parte estrutural*: Elementos físicos e rígidos da prótese (análogos aos ossos da mão). Aqui, definiram-se as dimensões dos dedos e da palma.

- *Parte geradora de movimento*: Componentes que permitem a flexão e extensão dos dedos (análogos a tendões e ligamentos). Selecionaram-se fios para simular tendões e elásticos para atuar como ligamentos, juntamente com servomotores que funcionam como músculos artificiais.

- *Parte de controle*: Sistema que direciona os movimentos da prótese (análogo ao cérebro humano). Escolheu-se um microcontrolador para gerenciar a ativação dos servomotores.

C. Projeto da prótese de mão

Para o projeto da prótese, selecionou-se o Tinkercad, um software de modelagem 3D online, gratuito e fácil de usar, ideal para usuários sem experiência prévia em design assistido por computador (CAD) [7]. Diferentemente de ferramentas mais avançadas, como Solidworks, AutoCAD ou Fusion 360, o Tinkercad permite criar modelos tridimensionais de forma intuitiva, baseados em geometria sólida construtiva.

O projeto baseou-se em duas referências principais: o trabalho de López [8] sobre próteses de mão servo-atuadas e o projeto de Gross [6] para próteses elétricas sem uniões entre articulações. No Tinkercad, modelaram-se as falanges, a palma da mão e o suporte para os servomotores, garantindo um design biomimético e funcional.

D. Impressão da prótese de mão

Utilizou-se uma impressora 3D Ender 3 v2, reconhecida por sua acessibilidade, facilidade de uso e boa relação custo-benefício [9]. Essa impressora emprega tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM), que fabrica peças camada por camada por meio da extrusão de filamentos termoplásticos, como PLA ou ABS, proporcionando resistência e precisão [10].

Os parâmetros de impressão foram configurados no Cura, um software de fatiamento que converte modelos 3D em arquivos de código G, compatíveis com a impressora (Marchante, 2020). Imprimiram-se as falanges, a palma e o suporte para os servomotores, registrando-se o tempo e o material utilizado em cada peça.

E. Montagem da prótese de mão

A montagem consistiu em unir todas as peças impressas. Os dedos foram fixados à palma por meio de elásticos, que permitem sua articulação e estabilização. Os servomotores foram colocados no suporte e conectados aos dedos por meio de fios que percorrem os canais internos da prótese. Finalmente, os servomotores foram conectados ao microcontrolador, completando a montagem.

F. Testes da prótese de mão

Realizaram-se vários testes para avaliar o desempenho da prótese. Funcionalidade: submeteu-se a prótese a testes de flexão e extensão de cada dedo. Preensão: consistiu em agarrar diferentes objetos com a prótese, observando a capacidade de agarrar objetos de diferentes formas e tamanhos. Transporte: consistiu em mover diversos objetos com a prótese, submetendo-a a ambientes variados. Abertura: consistiu em verificar se a prótese não trava e abre corretamente após agarrar objetos.

III. RESULTADOS

A. Anatomia e funcionalidade da mão

A mão humana é uma estrutura complexa que permite realizar múltiplos movimentos, como agarrar, segurar e manipular objetos. É composta por mais de 27 ossos e 40 músculos, o que lhe confere mais de 20 graus de liberdade. Possui músculos responsáveis por seu movimento e outros que limitam esses movimentos [8].

No documento de Moore [11] divide a anatomia óssea da mão em três grupos (Figura 1): Falanges, 14 ossos nos dedos (3 por dedo, exceto o polegar, que possui 2). Metacarpos, 5 ossos que formam a parte média da mão. Ossos do carpo, 8 ossos que compõem o punho.



Fig. 1. Anatomia da mão

Os músculos e tendões flexores permitem o movimento da mão. Segundo Vargas [12], os tendões flexores dividem-se em três grupos principais (Figura 2): a) tendões flexores do carpo, b) tendões flexores dos dedos e c) tendão flexor do polegar.

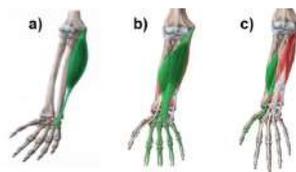


Fig. 2. Tendões flexores da mão

Tendões flexores do carpo, são o palmar maior, o palmar menor e o cubital anterior. *Tendões flexores dos dedos longos*,

são os flexores profundos dos dedos, que se inserem na falange distal, e os flexores superficiais dos dedos, que envolvem o flexor profundo através do quiasma de Camper e se inserem na falange média dos dedos. *Tendão flexor longo do polegar*, é um tendão único que se conecta ao polegar.

Os ligamentos, por sua vez, são tecidos conectivos que unem os ossos e proporcionam estabilidade [13]. Na Figura 3, mostram-se os movimentos essenciais da mão, como: a) preensão cilíndrica, b) de ponta, c) de gancho, d) palmar, e) esférica e f) lateral [5].

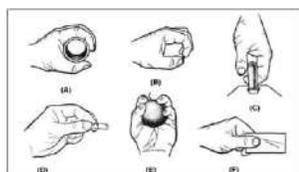


Fig. 3. Movimentos principais da mão

B. Características da prótese de mão

-*Parte estrutural*: Com base nas dimensões de uma mão natural [14] e próteses comerciais [15], definiram-se as medidas da palma e das falanges (Tabela I).

TABELA I
DIMENSÕES DAS PARTES DA MÃO

Parte da Mão	Subparte	Comprimento (mm)
Palma	-	103,51
Polegar	Falange Proximal	37
	Falange Distal	37,7
Dedo Indicador	Falange Proximal	29,9
	Falange Intermediária	28
Dedo Médio	Falange Distal	27,1
	Falange Proximal	33,6
	Falange Intermediária	32,3
Dedo Anelar	Falange Distal	28
	Falange Proximal	30,1
	Falange Intermediária	31,3
Dedo Mínimo	Falange Distal	28,6
	Falange Proximal	22,8
	Falange Intermediária	23,9
	Falange Distal	27,3

-*Parte geradora de movimento*: Utilizou-se fio de cana de 0,3 mm como tendão flexor devido à sua alta resistência e facilidade de manipulação, o que permite transmitir a força dos servomotores aos dedos sem se romper. Para a estabilização dos dedos, escolheram-se ligas cola de rato, pois mantêm os dedos firmes em posição estendida por padrão e permitem a flexão sem oferecer muita resistência, evitando danificar os servomotores. Os servomotores MG90S e SG90 foram selecionados por seu torque adequado (2 kg/cm) e tamanho compacto, o que permite a flexão completa dos dedos.

-*Parte de controle*: Empregou-se um Arduino Uno devido à sua facilidade de programação e acessibilidade.

C. Projeto da prótese de mão

O projeto da prótese focou-se em criar uma estrutura funcional e biomimética, utilizando o Tinkercad como ferramenta principal. O processo começou com a modelagem das falanges, seguindo as dimensões pré-definidas (Tabela I). Cada falange foi projetada com três canais: dois inferiores de 4,1 mm de diâmetro para a passagem dos elásticos e um superior de 1,54 mm para o fio de cana, que atua como tendão flexor. Para melhorar a aparência realista, a parte palmar de cada falange

foi levemente curvada (Figura 4a). Além disso, incluiu-se um ângulo de 45° nas extremidades de articulação para permitir a flexão completa dos dedos (Figura 4b).

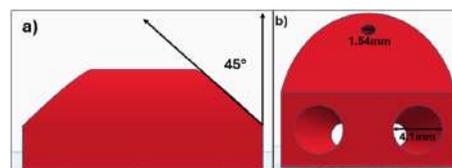


Fig. 4. Projeto da falange proximal do dedo médio

As falanges dos outros dedos foram projetadas de maneira similar, ajustando as dimensões de acordo com a Tabela I. A falange distal de cada dedo foi mais curvada na ponta para melhorar a biomimética e facilitar a preensão de objetos.

Em seguida, projetou-se a palma da mão, que foi o elemento maior e mais complexo de realizar. Esta foi projetada como um retângulo baseado nas dimensões da Tabela I, com inclinações divergentes na parte distal, simulando a disposição anatômica natural em que os dedos não partem da mesma altura (Figura 5a). Realizou-se um corte de 45° na parte distal, alinhado com o ângulo de flexão das falanges. A 62 mm da parte distal, no lado direito, projetou-se uma superfície para o polegar, inclinada 3° em relação ao plano da palma e girada para que, ao se contrair, aponte para o meio entre o dedo mínimo e o anelar. Na parte proximal, a palma foi estreitada para 42 mm e criou-se uma cavidade dorsal para encaixar o suporte dos servomotores (Figura 5b), incluindo canais para os elásticos e cabos flexores.

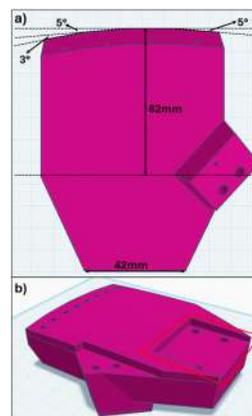


Fig. 5. Projeto da palma da mão vista de dois ângulos distintos

A última peça projetada foi o suporte para os servomotores. Projetou-se em uma plataforma de 120 mm x 82 mm. Colocaram-se cinco suportes para parafusar os servomotores, distribuídos de forma que as cruzetas não interferissem entre si (Figura 6b). Dois servomotores foram posicionados na parte distal, dois na parte medial e um na parte proximal, garantindo um movimento sincronizado dos dedos.

D. Impressão da prótese de mão

Utilizou-se uma impressora Ender 3 v2 com tecnologia FDM. Antes da impressão, calibrou-se a cama aquecida para manter uma distância uniforme de 0,15 mm entre o extrusor e a superfície. Para melhorar a adesão, aplicou-se cola em bastão. Após ajustar os parâmetros no software Cura (Tabela II), as

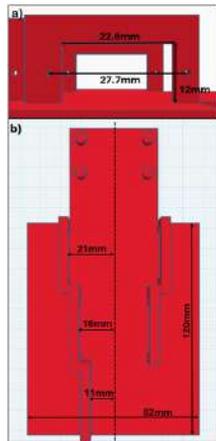


Fig. 6. Projeto de suporte para servomotores

peças foram impressas com sucesso, obtendo-se superfícies lisas e sem defeitos. Os tempos e materiais utilizados estão resumidos na Tabela III.

TABELA II
PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Parâmetro	Valor
Linhas de espessura da parede	2
Linhas de espessura das camadas superiores e inferiores	3
Velocidade de impressão	150 mm/s
Velocidade de impressão da camada inicial	10 mm/s
Temperatura de impressão	190°C
Temperatura de impressão da camada inicial	200°C
Temperatura da placa de impressão	60°C
Temperatura da placa de impressão na camada inicial	60°C
Borda de impressão	Sim

TABELA III
TEMPOS E MATERIAIS POR PEÇA

Peça	Tempo	Quantidade de material
Dedo médio	1 h 22 min	9g
Dedo indicador	1 h 23 min	8g
Dedo mínimo	59 min	6g
Dedo anelar e polegar	2 h 32 min	16g
Palma da mão	9 h 47 min	88g
Suporte para servomotores	4 h 57 min	34g

E. Montagem da prótese de mão

Na Figura 7, detalha-se a montagem: a) e b) cortaram-se as bordas de impressão de todas as peças; c) e e) uniu-se o dedo médio à palma, passando o elástico pelos canais das falanges e amarrando-o nos canais correspondentes da palma; f) montaram-se os dedos restantes (polegar, indicador, mínimo e anelar) de maneira similar; g) passou-se o fio de cana pelos canais de cada dedo e da palma, fixando-o nas falanges distais; h) ajustaram-se os servomotores ao suporte, uniu-se o conjunto à palma e conectaram-se os cabos às cruzetas e falanges distais. Finalmente, os servomotores foram conectados ao Arduino Uno, completando a implementação.

F. Testes da prótese de mão

Os resultados dos testes funcionais estão resumidos nas tabelas a seguir, onde se indicam com “Sim” os testes superados e com “Não” os não superados. Nos testes de funcionamento, todos os dedos alcançaram a flexão e extensão completas (Tabela IV). Nos testes de preensão, a prótese agarrou com sucesso uma bola de pingue-pongue, uma garrafa e um apagador de



Fig. 7. Montagem da prótese

quadro (Tabela V). No entanto, no teste de transporte, não foi possível mover a garrafa devido à falta de força de preensão (Tabela VI). Por fim, nos testes de abertura, a prótese liberou corretamente todos os objetos (Tabela VII).

TABELA IV
TESTES DE FUNCIONAMENTO

Dedo	Indicador	Médio	Anelar	Mínimo	Polegar	Todos
Flexão	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Extensão	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

TABELA V
TESTES DE PREENSÃO

Elemento	Resultado
Bola de pingue-pongue	Sim
Garrafa	Sim
Apagador de quadro	Sim

TABELA VI
TESTES DE TRANSPORTE

Elemento	Resultado
Bola de pingue-pongue	Sim
Garrafa	Não
Apagador de quadro	Sim

TABELA VII
TESTES DE ABERTURA

Elemento	Resultado
Bola de pingue-pongue	Sim
Garrafa	Sim
Apagador de quadro	Sim

IV. DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho demonstram que é possível implementar uma prótese de mão servo-atuada simples e acessível utilizando uma impressora 3D FDM. Essa abordagem contrasta com projetos mais complexos, como os de Álvarez et al. [16] e Yoshikawa et al. [17], que incluem conexões articulares e exigem maior experiência em modelagem 3D. A ausência de articulações em nosso projeto simplifica o processo de fabricação e montagem, embora limite levemente a funcionalidade, como evidenciado no teste de transporte de uma garrafa. Esse achado sugere que, embora as próteses sem articulações sejam ideais para iniciantes, projetos mais

V. CONCLUSÃO

avançados poderiam se beneficiar da incorporação de conexões articulares para melhorar a força de preensão e a versatilidade.

Em relação aos aspectos anatômicos, este trabalho concorda com Lopez [8] e Sopalo [5] sobre a importância de considerar os movimentos básicos da mão. No entanto, destaca-se a relevância dos tendões e ligamentos no projeto protético, uma vez que os cabos flexores e elásticos atuam como análogos funcionais dessas estruturas. Essa abordagem simplifica o projeto sem comprometer significativamente a funcionalidade, conforme apoiado por Arenas [18] em sua análise de próteses baseadas em princípios biomecânicos. Essa abordagem também permite maior flexibilidade na seleção de materiais, já que os cabos flexores e elásticos podem ser adaptados a diferentes tensões e forças.

A escolha do Tinkercad como software de projeto mostrou-se adequada para usuários sem experiência prévia em modelagem 3D, permitindo a criação de peças complexas com ferramentas básicas. Embora softwares profissionais como Rhino ou Fusion 360 ofereçam maior precisão e funcionalidades avançadas [19], o Tinkercad provou ser uma alternativa viável para projetos iniciais. Isso sugere que a barreira de entrada para o projeto de próteses 3D pode ser menor do que comumente se percebe, o que poderia incentivar uma maior participação de estudantes e profissionais nesse campo.

Em relação à impressão 3D, utilizou-se cola em bastão para melhorar a adesão da primeira camada, embora esse passo possa não ser necessário em impressoras de alta gama ou em ambientes com baixa umidade. Este estudo demonstrou que uma impressora econômica, como a Ender 3 v2, pode oferecer resultados funcionais. No entanto, os parâmetros de impressão variam de acordo com as condições ambientais, a qualidade do filamento e a configuração do equipamento [20]. Impressoras mais avançadas, como as Prusa, otimizam o tempo de impressão e a precisão, mas o foco desta pesquisa foi validar a viabilidade de dispositivos de baixo custo.

As medidas utilizadas basearam-se na literatura [15] e em observações próprias, mas não são absolutas. Em aplicações reais, devem ser ajustadas à outra mão do paciente ou às suas necessidades específicas para garantir conforto e funcionalidade [21].

Uma vantagem-chave dessa prótese é sua montagem simplificada. Diferentemente de projetos mais complexos [17], ela requer poucos passos: fixar os servomotores, uni-los à palma e conectar os cabos flexores e elásticos. Isso reduz o tempo de implementação, tornando-a ideal para ambientes educativos ou de baixos recursos.

A prótese desenvolvida apresentou bons resultados na maioria dos testes, alcançando a flexão e extensão completas dos dedos, bem como a preensão de objetos, com desempenho semelhante ao de projetos mais complexos [21]. No entanto, apresentou limitações no transporte de uma garrafa, possivelmente devido à posição do polegar e à ausência de conexões articulares. Melhorias como o ajuste da posição do polegar, a incorporação de articulações [17] e o uso de materiais como TPU poderiam otimizar seu desempenho. Além disso, a integração de sensores e sistemas de controle avançados [8] ampliaria suas aplicações em próteses mioelétricas.

Este trabalho demonstra que a implementação de próteses de mão 3D é acessível até mesmo para iniciantes, utilizando ferramentas simples como o Tinkercad e impressoras FDM econômicas. A prótese desenvolvida oferece um equilíbrio entre funcionalidade e simplicidade, sendo uma opção viável para aplicações educacionais ou como ponto de partida para projetos mais avançados.

Recomenda-se futuras pesquisas para melhorar a prótese, como a incorporação de conexões articulares e o ajuste da posição do polegar para aumentar a força de preensão. Além disso, sugere-se explorar o uso de materiais mais resistentes e leves, bem como a integração de sensores para um controle mais preciso.

Por fim, este artigo busca inspirar estudantes e profissionais na Bolívia e em outros países em desenvolvimento a explorar o campo das próteses 3D, demonstrando que não são necessários recursos econômicos significativos para iniciar projetos inovadores. A democratização dessas tecnologias pode ter um impacto transformador na qualidade de vida de pessoas com amputações, especialmente em regiões com acesso limitado a próteses comerciais.

REFERÊNCIAS

- [1] Lisandro Puglisi e Héctor Moreno. “Prótesis Robóticas”. es. Em: *Universidad Politécnica de Madrid* (2006). URL: <https://pdfcoffee.com/protesis-roboticas-9-pdf-free.html>.
- [2] Jan J. Stokosa. *Generalidades sobre las prótesis de los miembros*. es. Mar. de 2024. URL: <https://www.msmanuals.com/es/profesional/temas-especiales/miembro-prot%C3%A9sico/generalidades-sobre-las-pr%C3%B3tesis-de-los-miembros>.
- [3] Avesahemad S. N. Husainy, Atharv R. Joshi, Dhanashri S. Kore, Vaibhav V. Chougule, Rohan M. Thomake, Harshvardhan D. Kamat e Harshvardhan A. Jadhav. “Prosthetics for Lower Limb Amputees: A Comprehensive Review of Technologies, Applications, and Future Directions”. Em: *Asian Journal Of Engineering And Applied Technology* 13.1 (mar. de 2024), pp. 1–7. DOI: [10.70112/ajeat-2024.13.1.4233](https://doi.org/10.70112/ajeat-2024.13.1.4233). URL: <https://doi.org/10.70112/ajeat-2024.13.1.4233>.
- [4] Organización Mundial De la Salud. *Normas de ortoprotésica de la OMS*. es. 2017. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/259508>.
- [5] Josué Israel Sópalo Romero. “Diseño orientado a impresión 3D de mano protésica con articulaciones flexibles”. es. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid, 2019. URL: https://oa.upm.es/58339/1/TFM_JOSUE_ISRAEL_SOPALO_ROMERO_01.pdf.
- [6] Ryan Gross. *Robotic Prosthetic Hand by grossrc*. en. Jul. de 2016. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1691704>.
- [7] Oscar Costa. *Tinkercad Dando volumen a las ideas*. es. Fev. de 2021. DOI: [10.4438/2695-4176_OTE_2019_847-19-121-5](https://doi.org/10.4438/2695-4176_OTE_2019_847-19-121-5). URL: <https://intef.es/wp-content/uploads/2021/04/Tinkercad-1.pdf>.

- [8] M. López. “Diseño de Prótesis de mano servoactuada y fabricación de prototipo con técnicas de impresión 3D”. Tesis de doctorado. Tese de dout. Argentina: Universidad Nacional de Cuyo, 2018. URL: https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/700/1/1L%C3%B3pez_Morillo.pdf
- [9] All3DP. *Creativity Ender-3 V2 Review: The Best 3D Printer for Beginners?* Revisión técnica de la impresora Ender-3 V2. 2021. URL: <https://all3dp.com/1/creativity-ender-3-v2-review-3d-printer-specs/>.
- [10] Ian Gibson, David Rosen e Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2014. DOI: [10.1007/978-1-4939-2113-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3). URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [11] Keith L. Moore, Arthur F. Dalley e Anne M. R. Agur. *Anatomía con orientación clínica*. 8ª ed. Wolters Kluwer, 2018.
- [12] Ana Rosella Vargas Sáenz. *Fisiocampus*. es. Nov. de 2023. URL: <https://www.fisiocampus.com/articulos/el-aparato-flexor-de-la-mano-revision-de-su-anatomia-y-biomecnica>.
- [13] *Tendones y ligamentos: MedlinePlus enciclopedia médica ilustración 2024*. es. Jul. de 2024. URL: https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/19089.htm.
- [14] Ernesto Eduardo López López, Rigoberto Martínez Méndez e Adriana H. Vilchis González. “Diseño de una prótesis de mano para uso en teclados con interfaz sEMG”. es. Em: *ReCIBE. Revista Electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica* (2019). URL: <https://www.redalyc.org/journal/5122/512259512003/html/>
- [15] Pascal Weiner, Julia Starke, Felix Hundhausen, Jonas Beil e Tamim Asfour. “The KIT Prosthetic Hand: Design and Control”. Em: *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (out. de 2018), pp. 3328–3334. DOI: [10.1109/iros.2018.8593851](https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593851). URL: <https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593851>.
- [16] Ervin Jesús Alvarez Sánchez, Luis Enrique Escobar Jiménez, Armando Aburto Meneses e Rosario Aldana Franco. “Diseño, construcción e implementación de una prótesis de mano mecánica”. es. Em: *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología 2.5* (2018). URL: https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Ingenieria_Biomedica_y_Biotecnologia/vol2num5/Revista_de_Ingenieria_Biomedica_y_Biotecnologia_c3%ada_Biomc3%a9dica_y_Biotecnologc3%ada_V2_N5_2.pdf
- [17] Masahiro Yoshikawa, Ryo Sato, Takanori Higashihara, Tsukasa Ogasawara e Noritaka Kawashima. “Rehand: Realistic electric prosthetic hand created with a 3D printer”. en. Em: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (2015), pp. 2470–2473. DOI: [10.1109/embc.2015.7318894](https://doi.org/10.1109/embc.2015.7318894). URL: <https://doi.org/10.1109/embc.2015.7318894>.
- [18] Jorge Arenas Moles. “Diseño conceptual de una prótesis de mano”. es. Trabajo de Final de Grado. Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona, 2018. URL: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/122293/disen-conceptual-de-una-protesis-de-mano.pdf?sequence=1>
- [19] Juan Francisco Crespo Segura. *Modelado 3D Rhinoceros: Conoce sus ventajas y principales características*. es. Mar. de 2023. URL: <https://www.inesem.es/revistadigital/disen-y-artes-graficas/modelado-3d-rhinoceros/>.
- [20] B. M. Tymrak, M. Kreiger e J. M. Pearce. “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions”. Em: *Materials & Design* 58 (2014), pp. 242–246. DOI: [10.1016/j.matdes.2014.02.038](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038).
- [21] U Farooq, U Ghani, S A Usama e Y S Neelum. “EMG control of a 3D printed myo electric prosthetic hand”. Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 635.1 (out. de 2019), p. 012022. DOI: [10.1088/1757-899x/635/1/012022](https://doi.org/10.1088/1757-899x/635/1/012022). URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/635/1/012022>

AUTORES

Marco Fabian Borda Wiegert engenheiro biomédico formado pela Universidade Privada del Valle (UNIVALLE), com formação em desenvolvimento e implementação de exoesqueletos para assistência e reabilitação na Universidade Pública de El Alto (UPEA). Atuo no design e desenvolvimento de dispositivos biomédicos acessíveis, como próteses funcionais de baixo custo, e na aplicação da robótica na saúde, visando melhorar a qualidade de vida com inovações eficientes.



Dany Lileth Ferruffino Machado Sou estudante de Engenharia Biomédica na Universidad Privada del Valle (UNIVALLE) e atual presidenta do comitê estudantil Women in Engineering (WIE) da seção Bolívia, onde organizo oficinas e palestras voltadas para mulheres engenheiras. Também fui voluntária na ONG Mano a Mano Bolívia. Como estudante, busco compartilhar meu conhecimento em engenharia e cultura, alcançando comunidades de baixa renda na Bolívia para contribuir com seu desenvolvimento e bem-estar.



Brian Arauco Paniagua Estudante de Engenharia Biomédica da Universidade Privada do Vale - UNIVALLE, membro ativo do Centro de Pesquisa Transdisciplinar para a Promoção do Desenvolvimento da Inovação Sustentável e Digital (CIT-INOVAÇÃO), secretário-geral da IEEE Young Professional Seção Bolívia e membro ativo da Sociedade Científica de Estudantes de Engenharia Biomédica da UNIVALLE (SCEIB).



Start Engenharias: aperfeiçoamento do material didático sobre *Arduino* para aplicação nas escolas de ensino básico

André do Nascimento, Mateus Almeida de Jesús, Pedro Eugênio Ramos.
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
andre.nascimento@inatel.br, mateus.jesus@geb.inatel.br, pedro.eugenio@gep.inatel.br.

Abstract—Since 2021, the scientific initiation project “*Start Engenharias*” has aimed to develop and improve didactic material focused on teaching electronics and programming using the *Arduino* platform in Brazilian primary and secondary schools. The initiative began with introductory modules, covering basic hardware and software concepts, and evolved into a more structured and advanced content. In 2024, new components and programming structures were introduced, enhancing the pedagogical experience. This updated version strengthens student engagement, problem-solving skills, and aligns with the digital competencies required by current educational standards. The material is tested in public schools and is intended to support teachers in creating interactive and meaningful learning environments.

Index Terms—*Arduino*, electronics, basic education, programming.

Resumo—Desde 2021, o projeto de iniciação científica “*Start Engenharias*” tem como objetivo desenvolver e aperfeiçoar um material didático voltado ao ensino de *eletrônica* e *programação*, utilizando a plataforma *Arduino* como ferramenta pedagógica nas escolas de ensino básico. Inicialmente com módulos introdutórios, o projeto evoluiu ao longo dos anos, incorporando novos conteúdos e práticas. Em 2024, foi lançado um módulo complementar com a inserção de componentes mais avançados e estruturas de programação mais complexas. Esta atualização amplia as possibilidades didáticas, tornando o processo de ensino mais interativo, inclusivo e alinhado às demandas contemporâneas da educação tecnológica.

Palavras chave—*Arduino*, eletrônica, ensino básico, Programação.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por profissionais qualificados na área de tecnologia vem impulsionando mudanças significativas nos currículos escolares, especialmente após a implementação do Novo Ensino Médio no Brasil. A inserção de conteúdos técnicos no ambiente educacional tem se mostrado fundamental para a formação de jovens mais preparados para os desafios acadêmicos e do mercado de trabalho. Nesse contexto, a plataforma *Arduino* surge como um recurso educacional valioso, permitindo a introdução de conceitos básicos e avançados de *eletrônica* e *lógica de programação* de forma prática, acessível e envolvente.

O projeto “*Start Engenharias*” teve início em 2021, vinculado ao Núcleo de Relacionamento com Colégios (NRC) do Inatel, e surgiu como um desdobramento do *Arduino Challenge*, um torneio estudantil que promove a aplicação prática da tecnologia nas escolas. Desde sua criação, o projeto é apoiado pela FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, e tem como missão inspirar alunos

do ensino básico a explorarem as diversas áreas da engenharia e da tecnologia.

Nos primeiros anos, o projeto focou na produção de módulos introdutórios abordando os fundamentos da plataforma *Arduino*, incluindo estrutura física, pinos, comandos básicos como *pinMode()*, *digitalWrite()*, e o uso de componentes simples como LEDs, resistores e botões. Essas atividades foram aplicadas prioritariamente em escolas públicas da cidade de Pouso Alegre-MG, com a participação de professores e estudantes do Ensino Médio. Com o passar do tempo, observou-se a necessidade de expandir o escopo do material, incorporando elementos mais desafiadores que estimulassem a resolução de problemas e o pensamento lógico.

A presente versão do projeto, lançada em 2024, representa um avanço significativo em termos de escopo e profundidade. O novo módulo busca promover uma aprendizagem mais estruturada e progressiva, integrando conceitos de *programação estruturada*, novos sensores e atuadores, além de ferramentas de simulação digital como o *Tinkercad*.

II. DESENVOLVIMENTO

O novo módulo de 2024 representa uma evolução notável não apenas no conteúdo, mas também na forma como o ensino de *Arduino* é abordado. A estrutura pedagógica foi reorganizada para promover o desenvolvimento de competências técnicas e cognitivas, através de um modelo baseado em três eixos: fundamentos, aplicação e integração interdisciplinar.

A. Fundamentos Teóricos

Cada capítulo do novo material inicia-se com uma seção conceitual, onde são apresentados tópicos como:

- Conceitos de circuitos em série e paralelo, incluindo análise de resistência equivalente;
- Diferenças entre sinais digitais e analógicos, abordando os conceitos de PWM (modulação por largura de pulso);
- Fundamentos de controle de fluxo na programação (looping, condicionais, booleanos);
- Leitura e interpretação de sinais a partir de sensores utilizando a função *analogRead()*;
- Escrita em atuadores com *analogWrite()* e *digitalWrite()*;
- Organização modular do código utilizando funções personalizadas.

Esses conteúdos foram pensados para criar uma base sólida que possa ser retomada posteriormente em cursos técnicos e superiores nas áreas de eletrônica, automação, sistemas

embarcados e programação. Assim, o material funciona como uma ponte entre a educação básica e a formação tecnológica mais avançada.

Além disso, o material propõe a utilização de pseudocódigo antes da codificação, estimulando o pensamento computacional estruturado — uma competência valorizada nas diretrizes do Novo Ensino Médio. Ao descrever a lógica antes da implementação, os alunos desenvolvem habilidades de planejamento e abstração que favorecem o raciocínio lógico e a resolução de problemas em múltiplas áreas do conhecimento.

```
Início
  Definir pinoBotao como entrada
  Definir pinoLED como saída
  Enquanto verdadeiro faça
    Ler estado do botão
    Se botão estiver pressionado então
      Acender o LED
    Senão
      Apagar o LED
    FimSe
  FimEnquanto
Fim
```

Fig. 1. Exemplo de Pseudocódigo. Fonte: elaboração própria com uso da Arduino IDE .

Gráficos, fluxogramas e tabelas comparativas entre diferentes componentes enriquecem o conteúdo e facilitam a aprendizagem visual.

B. Simulação e Prototipagem Virtual

A plataforma Tinkercad é utilizada de forma sistemática para familiarizar os alunos com o ambiente de simulação antes da montagem física dos circuitos. O novo material inclui:

- Roteiros guiados com simulações passo a passo;
- Desafios no *modo livre*, onde o aluno cria um circuito do zero;
- Correção automática de circuitos por meio de checklists e validação de funcionamento;
- Exercícios comparativos entre o circuito idealizado e o simulado;
- Uso do multímetro virtual para aferição de tensão e corrente.

A simulação no Tinkercad permite uma abordagem mais segura e acessível, especialmente em escolas com recursos limitados. Enquanto a montagem física desenvolve habilidades motoras e realismo no processo de prototipagem, o ambiente virtual garante que todos os alunos possam praticar sem depender exclusivamente da disponibilidade de componentes físicos, além de permitir testes rápidos e correção imediata de erros.

Outro fator relevante é a curva de aprendizagem da interface, que se mostra amigável mesmo para iniciantes. Por ser intuitivo e baseado em arrastar-e-soltar, o Tinkercad contribui para reduzir a ansiedade inicial em relação à eletrônica e programação, permitindo que os estudantes ganhem confiança desde as primeiras interações.

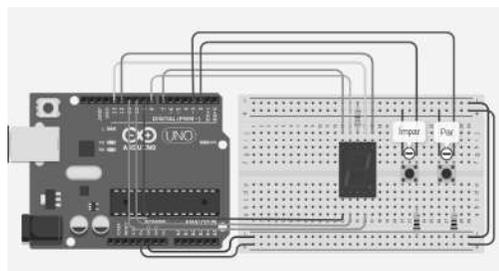


Fig. 2. Simulação de um dos desafios propostos utilizando o Visor de 7 Segmentos. Fonte: elaboração própria com uso do Tinkercad.

C. Projetos Integradores e Inovadores

Projetos de maior complexidade foram adicionados, abrangendo diferentes níveis de dificuldade. Entre eles:

Sensor de estacionamento inteligente: utilizando sensor ultrassônico, LEDs e buzzer para alertar distância em tempo real. Este projeto simula o funcionamento de tecnologias embarcadas em veículos modernos, podendo ser adaptado para aplicações em garagens automatizadas e estacionamentos residenciais.

Estação climática portátil: utilizando sensores de temperatura, umidade e luminosidade, com exibição em display LCD. Possui aplicabilidade em estudos de clima em tempo real e pode ser replicado em escolas rurais para coleta de dados meteorológicos locais.

Sistema de irrigação automatizado: com sensor de umidade do solo, relé e bomba de água, demonstrando um uso sustentável e contextualizado. É especialmente útil para projetos de hortas escolares ou iniciativas ambientais.

Cofre eletrônico com senha: aplicação de keypad matricial, servo motor e verificação condicional de códigos. Apresenta conceitos básicos de segurança eletrônica e controle de acesso, despertando interesse em áreas como mecatrônica e IoT.

Semáforo inteligente para pedestres com botão: agregando *delay*, estado lógico e temporização. Serve como modelo de protótipos urbanos e projetos de acessibilidade em cidades inteligentes.

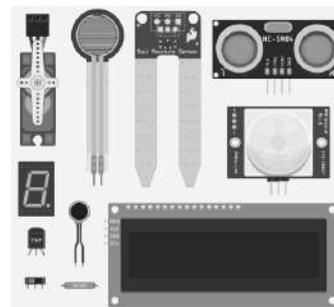


Fig. 3. Novos Componentes. Fonte: elaboração própria com uso do Tinkercad.

Para cada projeto, o material fornece não apenas o código e o circuito, mas também uma seção de “análise de funcionamento”, promovendo o desenvolvimento de competências alinhadas à Base Nacional Comum Curricular (BNCC), como raciocínio lógico, criatividade, pensamento crítico, solução de problemas, comunicação e trabalho colaborativo.

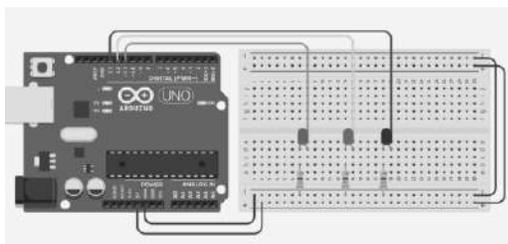


Fig. 4. Montagem no Tinkercad para simulação do Mini Semáforo Programável. Fonte: elaboração própria com uso do Tinkercad.

D. Avaliação Formativa e Diagnóstica

O novo módulo valoriza tanto a avaliação diagnóstica quanto a formativa. As práticas avaliativas são pensadas para promover reflexão e autonomia, com:

- Avaliações diagnósticas no início de cada unidade com perguntas abertas e atividades de revisão;
- Autoavaliações reflexivas ao final de cada capítulo;
- Checklists de competências desenvolvidas;
- Exercícios de *debugging*, onde o aluno precisa identificar e corrigir erros em códigos pré-montados;
- Avaliação por pares em dinâmicas de revisão coletiva.

O conteúdo também sugere como aplicar *rubricas de avaliação* qualitativa para medir aspectos como criatividade, organização, raciocínio lógico e uso correto da linguagem de programação.

E. Formação Docente e Interdisciplinaridade

Um dos principais focos da atualização foi apoiar os professores na integração do material em sua prática pedagógica. O manual do educador, incluído como anexo, fornece:

- Sugestões de planos de aula semanais com metas de aprendizagem;
- Orientações para trabalhar com turmas multisseriadas;
- Propostas de atividades interdisciplinares com matemática (cálculo de resistores), ciências (medição de variáveis ambientais) e geografia (projetos de estações meteorológicas);

Uma das maiores dificuldades enfrentadas pelos professores — especialmente aqueles sem formação técnica — é a familiaridade com os conceitos de eletrônica e programação. Pensando nisso, o projeto oferece uma linguagem acessível, exemplos contextualizados e apoio visual para facilitar a adoção dos conteúdos.

Além disso, o manual busca superar barreiras tecnológicas por meio de roteiros detalhados, vídeos tutoriais e uma curadoria de plataformas gratuitas. Isso permite que o professor atue com segurança mesmo sem experiência prévia na área.

F. Impacto Social e Inclusão Digital

O projeto visa também combater desigualdades de acesso ao conhecimento tecnológico. Sua aplicação prioritária em escolas públicas permite que estudantes em situação de vulnerabilidade possam:

- Ter contato com ferramentas de programação e eletrônica moderna;
- Desenvolver habilidades exigidas no mercado de trabalho;
- Explorar talentos em áreas ainda pouco acessíveis em seu contexto escolar;
- Trabalhar em grupo com foco em soluções locais e comunitárias.

Mais do que o aprendizado técnico, a inclusão digital promovida pelo projeto tem despertado e mantido o interesse dos alunos pelo estudo como um todo. O contato com a tecnologia tem funcionado como um catalisador da curiosidade, da autoestima e da percepção de futuro, principalmente entre aqueles que não viam sentido em conteúdos escolares tradicionais.

Professores relataram que os alunos mais tímidos demonstraram maior participação nas atividades práticas, e que os projetos despertaram interesse por áreas como engenharia, tecnologia da informação e robótica.

G. Resultados e Repercussões

Os resultados da implementação do novo módulo foram medidos por instrumentos quantitativos e qualitativos. Entre os dados observados:

- 87% dos alunos afirmaram ter compreendido melhor os conceitos ao usar a plataforma *Tinkercad*;
- 64% demonstraram interesse em participar de projetos de iniciação científica após o curso;
- Professores de matemática relataram melhora no desempenho em conteúdos de álgebra e lógica;
- As escolas participantes solicitaram expansão do projeto para alunos do 9º ano do ensino fundamental.

Além disso, o projeto foi apresentado em eventos científicos regionais e despertou o interesse de outras instituições que buscam aplicar o material como componente curricular.

III. CONCLUSÃO

A constante evolução do projeto demonstra a importância do investimento em iniciativas que promovam o acesso ao conhecimento tecnológico desde a Educação Básica. O aperfeiçoamento do material didático em 2024 não apenas ampliou o conteúdo disponível, mas também reforçou a proposta de formação integral dos estudantes, por meio de atividades que estimulam o raciocínio lógico, a criatividade e a autonomia.

Com uma abordagem progressiva, acessível e alinhada às necessidades educacionais contemporâneas, o projeto se consolida como uma ferramenta eficaz para o ensino de tecnologia nas escolas brasileiras. Ao democratizar o acesso à eletrônica e à programação, o “Start Engenharias” contribui para reduzir desigualdades e despertar vocações em áreas estratégicas para o futuro do país.

A formação contínua dos docentes, aliada ao uso inteligente de recursos gratuitos e acessíveis, tem se mostrado um pilar essencial para a sustentabilidade do projeto. Espera-se que, nos próximos anos, novas versões do material possam incorporar ainda mais inovações — como Internet das Coisas, inteligência artificial e sistemas embarcados — mantendo o

compromisso com a excelência educacional e o protagonismo estudantil.

Que esta iniciativa inspire escolas, educadores e gestores públicos a apostarem no poder transformador da tecnologia como ferramenta de inclusão, cidadania e futuro.

AUTORES

André do Nascimento



Graduado em Engenharia de Telecomunicações pelo Inatel e Técnico em eletrônica com ênfase em Telecomunicações pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa. Atuou como especialista em Redes Móveis em parceria com grandes empresas de telecomunicações, como

Ericsson e Nokia. Atualmente atua como especialista em sistemas, desenvolvendo atividades de engenharia voltadas ao público de ensino médio pelo Núcleo de Relacionamento com Colégios do Inatel. É coordenador do projeto "Torneio de *Arduino Challenge*: um estímulo às carreiras de engenharia e tecnologia – I".

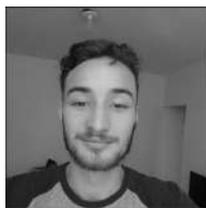
Mateus Almeida de Jesús Gra-



duando em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações. Monitor de Química e Ciências dos Materiais, bolsista na iniciação científica "Elaboração de material didático sobre Arduino para aplicação nas escolas de ensino básico", atuou como bolsista da iniciação científica "Torneio Arduino Challenge: um estímulo às carreiras de engenharia e tecnologia" e como voluntário no projeto

Start_Engenharia - Telecomunicações, membro da ISA (International Society of Automation) Inatel Student Section e antigo membro do Ehealth Innovation Center.

Pedro Eugênio Ramos



Graduando em Engenharia de Produção no Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel. Técnico em Mecatrônica pelo Colégio Técnico Opção. Experiência de estágio em manutenção de pistolas pneumáticas na empresa Vacina Contra Roubo, e em seguida experiência de estágio na

Empresa Brasileira de Aeronáutica - EMBRAER, na área de prototipagem e manutenção de aeronaves. Atuou como bolsista na iniciação científica "Torneio de *Arduino Challenge*: um estímulo às carreiras de engenharia e tecnologia – I e é atualmente bolsista da Iniciação Científica "Elaboração de um material didático sobre *Arduino* para aplicação nas escolas de ensino básico."

Estudo para o Desenvolvimento de um Aplicativo de Alfabetização Matemática

R. F. S. Silva, E. L. J. Junior, G. F. Finazzi, L. G. Garcia, T. E. P. Oliveira, J. P. T. Dias, Wanderson E. Saldanha

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

rayana.fernanda@geb.inatel.br, giovani.f@ges.inatel.br, thais.emanuelle@ges.inatel.br,

leticia.geovana@geb.inatel.br, dias.joao@ges.inatel.br, wsaldanha@inatel.br

Abstract—This article presents a study on the development of AlfaMat, a gamified educational application designed to optimize the teaching and learning of mathematics. The research aims to evaluate the feasibility and potential of AlfaMat as an innovative tool to assist students in improving their mathematical skills. To achieve this, an in-depth literature review was conducted, covering concepts of gamification in mathematics education, as well as instructional design strategies that promote engagement and knowledge retention. Additionally, Artificial Intelligence-based approaches were analyzed to personalize the user experience, adapting content and challenges according to each student's individual progress. The expected results include increased student motivation, reduced learning difficulties, and a positive impact on academic performance, demonstrating the potential of AlfaMat as a unique and effective educational resource.

Index Terms—AlfaMat, learning, teaching, gamification, Math.

Resumo—Este artigo apresenta um estudo sobre o desenvolvimento do AlfaMat, um aplicativo educacional gamificado projetado para otimizar o ensino e a aprendizagem da matemática. A pesquisa busca avaliar a viabilidade e o potencial do AlfaMat como uma ferramenta inovadora para auxiliar estudantes no aprimoramento de suas habilidades matemáticas. Para isso, foi realizada uma revisão aprofundada da literatura, abrangendo conceitos de gamificação no ensino de matemática, bem como estratégias de design instrucional que favorecem o engajamento e a retenção do conhecimento. Além disso, foram analisadas abordagens baseadas em Inteligência Artificial para personalizar a experiência do usuário, ajustando conteúdos e desafios conforme o progresso individual de cada estudante. Os resultados esperados incluem maior motivação dos alunos, redução das dificuldades de aprendizado e um impacto positivo no desempenho acadêmico, demonstrando o potencial do AlfaMat como um recurso educacional diferenciado e eficaz.

Palavras chave—AlfaMat, aprendizado adaptativo, ensino de matemática, gamificação, Inteligência Artificial. .

I. INTRODUÇÃO

A matemática é uma disciplina essencial para diversas áreas do conhecimento e do desenvolvimento humano, sendo um dos pilares da educação formal. No entanto, muitos estudantes enfrentam dificuldades significativas em sua aprendizagem, o que pode levar à desmotivação e a um baixo desempenho acadêmico. Diante desse cenário, pesquisadores têm buscado novas abordagens pedagógicas que tornem o ensino mais dinâmico e atrativo.

Uma revisão bibliográfica conduzida por Rosa (2022) [1] analisou o impacto da gamificação no ensino de matemática, destacando sua eficácia na promoção do engajamento dos alunos e na melhoria do processo de aprendizado. A gamificação,

ao incorporar elementos típicos de jogos, como desafios progressivos, recompensas e feedback imediato, tem se mostrado uma estratégia promissora para estimular o interesse e a participação ativa dos estudantes.

Com base nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo investigar como a gamificação pode influenciar positivamente o engajamento dos alunos e contribuir para a melhora do desempenho acadêmico na disciplina de matemática. Para isso, propõe-se o desenvolvimento do AlfaMat, uma ferramenta interativa baseada em tecnologia digital e princípios da gamificação. O AlfaMat será estruturado em módulos de aprendizado e incorporará mecânicas de jogabilidade, tornando o processo de ensino mais envolvente e motivador.

Este artigo abordará a concepção do AlfaMat, explorando seu design educacional, os fundamentos teóricos que embasam sua estrutura e as expectativas em relação aos resultados esperados. Ao examinar o potencial da gamificação no ensino da matemática, este estudo busca contribuir para o avanço das práticas pedagógicas, fornecendo subsídios para uma melhor compreensão de como as tecnologias digitais podem ser utilizadas para aprimorar a aprendizagem em disciplinas fundamentais. Além disso, pretende-se discutir como ferramentas interativas podem impactar a autonomia dos estudantes, incentivando uma abordagem mais ativa e personalizada do aprendizado.

II. ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO

O desenvolvimento do AlfaMat baseia-se na ideia de uma trilha de aprendizado estruturada, onde os alunos são guiados por diferentes conceitos matemáticos de forma progressiva. Cada módulo aborda um tópico específico, permitindo que os estudantes construam seu conhecimento de maneira gradual. O sistema também incorpora elementos de gamificação, proporcionando recompensas a cada conquista, como pontos, distintivos e acesso a conteúdos exclusivos. Essa abordagem visa aumentar o engajamento e a motivação dos alunos, criando um ambiente de aprendizado estimulante e interativo.

A. Implementação Tecnológica

O AlfaMat foi desenvolvido utilizando o Kodular Creator, uma ferramenta de desenvolvimento visual que permite a criação de aplicativos educacionais sem necessidade de codificação extensiva. Além disso, a plataforma conta com um sistema de inteligência artificial baseado no TensorFlow, uma das bibliotecas mais utilizadas para aprendizado de máquina. Essa IA desempenha um papel fundamental na adaptação do

aprendizado, analisando o desempenho dos alunos e ajustando automaticamente a dificuldade dos exercícios conforme a necessidade individual de cada usuário.

B. Mecânicas de Gamificação

Para manter os alunos engajados, o AlfaMat utiliza estratégias de gamificação que transformam o aprendizado em uma experiência dinâmica e motivadora. As principais mecânicas incluem:

Acúmulo de pontos para desbloquear novos módulos e desafios.

Distintivos virtuais para reconhecer conquistas específicas.

Sistema de progressão de níveis, refletindo o avanço do aluno.

Acesso a conteúdos exclusivos, como vídeos explicativos e exercícios adicionais.

Essa abordagem visa incentivar os alunos a persistirem no aprendizado, tornando o estudo mais dinâmico e recompensador.

C. Monitoramento e Aprendizado Adaptativo

A integração da inteligência artificial permite um monitoramento preciso do desempenho dos alunos. Com base nas respostas fornecidas, a IA ajusta dinamicamente a dificuldade das questões, garantindo que cada estudante receba desafios compatíveis com seu nível de conhecimento. Além disso, relatórios personalizados são gerados para auxiliar professores e alunos no acompanhamento da evolução acadêmica. Estudos como o de Sun, Xie e Anderman (2018) [2] destacam a importância da autorregulação do aprendizado (self-regulated learning) para o sucesso dos alunos em ambientes educacionais adaptativos, reforçando a relevância de estratégias que promovam a autonomia e a personalização no processo de ensino.

Essa abordagem inovadora visa personalizar o ensino da matemática, tornando-o mais acessível, eficiente e motivador para todos os usuários do AlfaMat.

III. A IMPORTÂNCIA DA MOTIVAÇÃO E DO ENGAJAMENTO

A matemática, muitas vezes vista como um desafio, pode se transformar em uma jornada de descobertas quando os alunos se sentem motivados e engajados. O AlfaMat surge como uma proposta inovadora, utilizando estratégias que unem tecnologia e educação para criar uma experiência de aprendizado mais interativa e significativa. Ao adotar práticas que incentivam a curiosidade e a participação ativa, o AlfaMat busca não apenas facilitar a compreensão dos conceitos matemáticos, mas também inspirar os estudantes a explorar a disciplina com confiança e entusiasmo.

Essa abordagem reconhece que, para muitos alunos, a matemática vai além de números e fórmulas; ela é uma ferramenta para desenvolver habilidades como raciocínio lógico, criatividade e resiliência. Ao integrar elementos que tornam o aprendizado mais envolvente e personalizado, o AlfaMat abre caminho para uma educação matemática que valoriza o progresso individual e o desenvolvimento de competências essenciais para o futuro.

IV. PROTÓTIPO

A. Linguagem e IDE

O desenvolvimento do AlfaMat foi realizado utilizando a linguagem de programação Python, uma escolha estratégica devido à sua versatilidade, facilidade de aprendizado e vasta gama de bibliotecas disponíveis. Python é amplamente reconhecido por sua sintaxe clara e legível, o que facilita a manutenção e a escalabilidade do projeto. Além disso, sua compatibilidade com frameworks e ferramentas modernas torna-o ideal para a criação de aplicativos interativos e dinâmicos, como o AlfaMat.

B. Interação aluno-aplicativo

Interface Amigável e Intuitiva O AlfaMat será projetado com uma interface simples e visualmente atraente, pensada para ser acessível a alunos de diferentes idades e níveis de conhecimento. Menus claros, ícones explicativos e uma navegação fluida garantirão que os estudantes consigam usar o aplicativo sem dificuldades.

C. Inteligência Artificial

A integração da Inteligência Artificial (IA) no AlfaMat oferece uma perspectiva promissora para otimizar o aprendizado de matemática. De acordo com estudos como o de Johnson2016[3], o uso do modelo de Aprendizado Supervisionado se mostra vantajoso devido à sua capacidade de analisar dados históricos do desempenho dos alunos e suas interações com o aplicativo. Isso permite que o sistema identifique padrões de aprendizado individuais e ajuste dinamicamente o conteúdo e as atividades conforme as necessidades específicas de cada usuário. Além disso, o aprendizado supervisionado possibilita a geração de feedback personalizado, o que contribui significativamente para uma experiência de aprendizado mais eficaz e envolvente. Com essa abordagem, o AlfaMat tem o potencial de proporcionar uma aprendizagem mais adaptativa e eficiente, atendendo melhor às necessidades individuais dos alunos e promovendo um engajamento mais profundo com o conteúdo matemático.

V. CONCLUSÃO

A divisão do conteúdo em doze módulos no AlfaMat permite uma abordagem estruturada e progressiva do ensino de matemática, garantindo que os alunos adquiram conhecimento de forma gradual e consolidada. Foi observado que o primeiro módulo é o mais longo, pois cobre uma ampla gama de conceitos fundamentais, incluindo frações, operações com frações, expressões numéricas, propriedades das operações matemáticas e introdução a conceitos algébricos. A solidez dessa base é essencial para que os alunos desenvolvam um raciocínio matemático estruturado e consigam progredir nos módulos subsequentes com maior segurança e compreensão.

Além da estruturação em módulos, a estratégia de gamificação implementada no AlfaMat desempenha um papel central no engajamento dos alunos. O sistema de recompensas utilizado busca ativar mecanismos do sistema de recompensa do cérebro humano, favorecendo a motivação intrínseca e extrínseca. Ao estimular os alunos por meio de desafios progressivos e recompensas por acertos, a plataforma promove um ambiente de aprendizado mais dinâmico e envolvente,

reduzindo a aversão tradicional que muitos estudantes possuem em relação à matemática.

Outro aspecto relevante do AlfaMat é a capacidade de adaptação do conteúdo conforme o desempenho dos alunos. Essa abordagem personalizada permite que estudantes que apresentam dificuldades possam revisar e reforçar os conceitos antes de avançar para tópicos mais complexos, enquanto aqueles com maior facilidade podem seguir um ritmo mais acelerado, garantindo um aprendizado eficiente e adequado a diferentes perfis de alunos.

Espera-se que a implementação do AlfaMat, com sua metodologia gamificada e abordagem modular, contribua significativamente para o aprimoramento do ensino de matemática, tornando o processo de aprendizado mais acessível, interativo e eficaz. Além disso, o estudo do AlfaMat representa um avanço na exploração do potencial da gamificação no contexto educacional, sugerindo novas possibilidades para o desenvolvimento de ferramentas pedagógicas inovadoras. Pesquisas futuras poderão avaliar a longo prazo o impacto da plataforma no desempenho acadêmico dos alunos, bem como explorar novas formas de integração da tecnologia ao ensino da matemática, ampliando ainda mais as oportunidades de aprendizado de qualidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Emiliana Faria Rosa, Gabriela de Moraes Chaves, José Antonio Ribeiro de Moura, Leandro Mayer, Lopes Neta e Natércia de Andrade. “Educação em pauta: desafios e possibilidades formativas”. Em: (2022).
- [2] Zhiru Sun, Kui Xie e Lynley H Anderman. “The role of self-regulated learning in students’ success in flipped undergraduate math courses”. Em: *The internet and higher education* 36 (2018), pp. 41–53.
- [3] Daniel Johnson, Sebastian Deterding, Kerri-Ann Kuhn, Aleksandra Staneva, Stoyan Stoyanov e Leanne Hides. “Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature”. Em: *Internet interventions* 6 (2016), pp. 89–106.

INOVAÇÃO METODOLÓGICA: A Aprendizagem Baseada em Problemas dentro dos espaços de aprendizagem

Leonardo Henrique de Almeida Pedro, Daianna Brasília Araújo Pompeu, Roger Antonio Rodrigues, Larissa Ferreira Dias Leite

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

leonardo.pedro@alunos.unis.edu.br,

daianna.neves@professor.unis.edu.br,

roger.rodrigues@unis.edu.br,

larissa.leite@professor.unis.edu.br

Abstract

The advancement of active methodologies has driven significant changes in teaching and learning processes, providing greater autonomy and engagement for students. Among these approaches, Problem-Based Learning (PBL) stands out, which uses problem-solving as a central strategy to promote meaningful learning. In this model, the student takes an active role in the construction of knowledge, while the teacher acts as a facilitator, guiding the investigation and stimulating critical thinking. PBL favors the contextualization of content, the development of collaborative skills and the practical application of knowledge, becoming an essential tool for academic and professional training. Widely adopted in several areas, this methodology has proven effective in training students for the challenges of the job market and contemporary society. Thus, PBL has consolidated itself as an educational innovation that transforms the relationship between teaching and learning, making it more dynamic and effective.

Index Terms: Active Methodology, Problem-Based Learning, Education, Collaborative Teaching.

Resumo

O avanço das metodologias ativas tem impulsionado mudanças significativas nos processos de ensino e aprendizagem, proporcionando maior autonomia e engajamento dos estudantes. Dentre essas abordagens, destaca-se a Problem-Based Learning (PBL), que utiliza a resolução de problemas como estratégia central para promover um aprendizado significativo. Nesse modelo, o aluno assume um papel ativo na construção do conhecimento, enquanto o docente atua como facilitador, orientando a investigação e estimulando o pensamento crítico. A PBL favorece a contextualização dos conteúdos, o desenvolvimento de habilidades colaborativas e a aplicação prática do conhecimento, tornando-se uma ferramenta essencial para a formação acadêmica e profissional. Amplamente adotada em diversas áreas, essa metodologia demonstra eficácia na capacitação dos alunos para os desafios do mercado de trabalho e da sociedade contemporânea. Assim, a PBL se consolida como uma inovação educacional que transforma a relação entre ensino e aprendizagem, tornando-a mais dinâmica e eficaz.

Palavras chave: Aprendizagem Baseada em Problemas, Educação, Ensino Colaborativo.

I. INTRODUÇÃO

A educação tradicional tem sido amplamente questionada diante das demandas contemporâneas, especialmente no contexto do Ensino Superior. Com a crescente inovação nas Instituições de Ensino Superior (IES), torna-se fundamental a adoção de práticas pedagógicas que acompanhem essa evolução, visando o alcance de excelência no ensino e aprendizagem de uma gama de estudantes cada vez mais diversa e exigente. Nesse cenário, as metodologias ativas emergem como uma abordagem inovadora, promovendo um ensino centrado no aluno. A Problem-Based Learning (PBL), apesar de ser algo iniciado nos anos sessenta, traz uma temática muito contemporânea devido ao seu uso nos dias atuais e redefine o papel do discente, tornando-o protagonista do próprio aprendizado, enquanto o docente atua como mediador e facilitador do conhecimento.

Para fundamentar a presente discussão, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica acerca da temática proposta, com o intuito de reunir, analisar e sintetizar contribuições teóricas relevantes já produzidas sobre o assunto. A revisão tem como objetivo oferecer um panorama crítico do conhecimento acumulado, identificar lacunas existentes na literatura e subsidiar reflexões que fortaleçam o desenvolvimento da pesquisa.

Além disso, conforme citado por Campos et al. (2016), o aluno é apresentado a uma nova forma de lidar e resolver os problemas propostos, adotando uma abordagem mais ativa e autônoma no processo de aprendizagem, o que é extremamente necessário frente às frequentes dificuldades encontradas pelos docentes na prática diária nas diversas etapas da educação. Diferente do método tradicional de ensino, no qual o professor frequentemente assume o papel de transmissor de conhecimento, informando ao aluno o que deve ser feito ou memorizado, a metodologia baseada em problemas incentiva o estudante a explorar, analisar e aplicar o conhecimento de maneira mais crítica e prática. Essa mudança de foco, em que o aluno se torna protagonista de seu aprendizado, permite um maior desenvolvimento de habilidades cognitivas, como a resolução de problemas e a capacidade de reflexão, além de promover uma aprendizagem mais significativa.

Então, visando uma necessidade de inovação no campo educacional, surgiram as metodologias ativas, trazendo uma nova vertente para a educação, transformando o ensino e dando a ele mais qualidade frente às novas demandas da sociedade contemporânea. [5]

A. Conceito de Metodologias Ativas

Dentro do ensino e, com o passar dos anos, ocorreram diversas atualizações nas metodologias educacionais. Dentre essas inovações, destacam-se as metodologias ativas e, entre elas, a Aprendizagem Baseada em Problemas, que será explorada neste estudo.

De acordo com Bes et al. (2020), na educação tradicional o indivíduo é educado para compreender, de forma gradual e linear, os conhecimentos científicos e tecnológicos, assim como os conceitos históricos acumulados pela humanidade ao longo do tempo. Nessa abordagem, o processo de ensino se baseia fortemente na transmissão de saberes já consolidados, os quais são repassados do professor para o aluno. Esse modelo considera o docente como figura central e detentora do conhecimento, sendo o principal agente responsável por organizar, selecionar e apresentar conteúdos que, em sua maioria, são tidos como verdades absolutas, com diferentes níveis de relevância. O aluno, por sua vez, ocupa uma posição mais passiva, sendo visto como receptor das informações, o que limita sua participação ativa na construção do conhecimento. Ainda segundo os autores, essa estrutura tradicional mantém uma hierarquia rígida entre quem ensina e quem aprende, valorizando pouco a interação crítica e a contextualização dos saberes no cotidiano dos estudantes. [3]

Esse modelo, porém, vem sendo cada vez mais questionado diante das novas demandas sociais e educacionais, o que impulsiona reflexões sobre a necessidade de transformação no processo de ensino-aprendizagem. Sendo assim, pode-se concordar com Bes et al (2020), o qual explica que a educação contemporânea busca reinventar-se com as práticas pedagógicas inovadoras, buscando conciliar algumas características e práticas dos modelos educacionais tradicionais com os novos elementos didáticos dessa geração, onde o aluno é o protagonista do seu ensino, de forma que a aprendizagem se torne mais produtiva, eficiente, interessante e significativa, aliando-se ao universo cultural dos alunos. [3]

Com uma reinterpretação da citação acima, de uma educação contemporânea, Mota e Rosa (2018, p. 261-276) relata que as metodologias ativas surgiram na década de 1980, como uma alternativa a uma tradição de aprendizagem passiva e facilitadora de conhecimento, onde a apresentação oral dos conteúdos, por parte do docente, se constituía como única estratégia didática. Ao contrário do ensino tradicional, na metodologia ativa o aluno é estimulado a ter uma postura ativa de responsabilidade em seu processo de conhecimento e aprendizagem, buscando autonomia dentro desses processos. A metodologia consiste em técnicas onde a interação docente e discente, discente e discente e discente com os materiais e recursos didáticos são constantemente estimuladas. [10] Mesmo não sendo tão atual enquanto surgimento, as metodologias ativas não foram tão rapidamente adotadas ou mesmo conhecidas em sua essência em âmbito tanto acadêmico quanto nacional, desta forma, pode-se afirmar que a sua aplicação ainda está em processo.

B. Conceitos da Aprendizagem Baseada em Problemas

Dentre os diversos conceitos e abordagens presentes em uma metodologia ativa, destaca-se a Problem-Based Learning (PBL), que promove uma aprendizagem mais significativa ao incentivar a autonomia, o pensamento crítico e a resolução de problemas no contexto educacional, estimulando a construção ativa do discente ao conhecimento, incentivando suas habilidades e pensamento crítico.

De acordo com essa perspectiva, Pischetola e Miranda (2013) salientam que, para que o aluno se envolva de forma efetiva no processo de aprendizagem, é necessário que ele esteja diretamente engajado com a resolução de problemas reais e com a prática pedagógica significativa. A simples exposição de conteúdos, característica do modelo tradicional, não é suficiente para garantir o envolvimento ativo dos estudantes com o conhecimento. Nesse novo cenário, a sala de aula transforma-se em um espaço de investigação e construção do saber, no qual o professor atua como mediador e facilitador do processo de aprendizagem. A aprendizagem deixa de ser centrada apenas na memorização de informações para se tornar uma experiência mais dinâmica, em que os alunos assumem o protagonismo de sua formação intelectual. Com isso, os discentes passam a propor soluções para situações-problema, muitas vezes inspiradas em contextos concretos do cotidiano, o que contribui significativamente para a assimilação dos conceitos trabalhados. Essa metodologia permite que o aprendizado se torne mais profundo, reflexivo e conectado com a realidade social em que os estudantes estão inseridos. [13]

Além disso, Oliveira (2010) afirma que esses métodos favorecem de maneira significativa a aprendizagem ativa, uma vez que promovem a participação conjunta e colaborativa entre docentes e discentes ao longo do processo educacional. A interação entre os sujeitos envolvidos na prática pedagógica torna-se um elemento central para a construção do conhecimento, superando a lógica transmissiva e passiva do ensino tradicional. Nessa abordagem, o aluno deixa de ser um receptor de conteúdos prontos para se tornar um agente ativo e reflexivo em sua própria trajetória de aprendizagem. A valorização do diálogo, da cooperação e da problematização contribui para o desenvolvimento de competências que ultrapassam os limites do conteúdo disciplinar, estimulando a formação de sujeitos críticos e conscientes do seu papel na sociedade. Desse modo, ao serem inseridos em situações que exigem análise, tomada de decisão e criatividade, os estudantes tornam-se capazes de identificar problemas relevantes no seu contexto e buscar soluções adequadas, fundamentadas em argumentos sólidos e experiências vividas. [11]

Em continuidade a essa perspectiva, seguindo o contexto de Alves et al. (2019), essa abordagem vem sendo muito utilizada em diversos contextos educacionais, onde está sendo amplamente difundido na área de engenharia e cursos afins, uma vez que traz motivação para o discente e aplicabilidade para o conhecimento adquirido. Nela, os estudantes se envolvem em diversos contextos do mundo real e atual, que são semelhantes aos que os profissionais são confrontados durante sua jornada de trabalho ou no meio em que vivem. [1]

Conforme Coletto et al. (2018), existem muitos recursos tecnológicos e materiais pedagógicos disponíveis para utilização em sala de aula. Dessa forma, é necessário que o professor tenha não somente um planejamento pedagógico atrelado a essas tecnologias, mas também uma preparação anterior e estudos sobre essa metodologia, uma vez que ela permite ao aluno ter um contato mais livre com a aprendizagem e com a informação. O professor, agora, é precursor e orientador que auxilia o aluno na busca pelo conhecimento. [7]

Nesse novo cenário, a atuação docente exige não apenas domínio técnico dos recursos disponíveis, mas também sensibilidade pedagógica para integrá-los de maneira significativa ao conteúdo curricular. A mediação do professor torna-se essencial para transformar as ferramentas digitais em instrumentos de aprendizagem ativa, adaptando o uso dos recursos às necessidades específicas dos estudantes.

Dando continuidade à reflexão sobre metodologias centradas no aluno, Parker (2020) traz a proposta de focar em um aprendizado que seja flexível e crítico, trazendo autonomia aos discentes. John Dewey, grande filósofo e pedagogo norte-americano, foi um dos pioneiros na pesquisa sobre esse tema, introduzindo a utilização de brincadeiras como ferramentas para facilitar a aprendizagem dos contextos sociais, estimulando o pensamento crítico e promovendo o engajamento ativo com o ambiente. [12]

Em consonância com essa abordagem centrada na autonomia discente, Scheffer e Lunardi (2018) destacam que, nessa metodologia, os docentes apresentam um caso para estudo, e os discentes constroem seu conhecimento ao longo de um processo ativo, no qual identificam o problema, investigam, debatem, interpretam e propõem possíveis soluções. Todo esse percurso favorece o desenvolvimento de habilidades cognitivas e sociais, uma vez que a construção do conhecimento é centrada no aluno e realizada por ele, promovendo maior protagonismo e engajamento no processo de aprendizagem. [14]

Nesse sentido, para aprofundar a compreensão sobre a estrutura e os fundamentos da metodologia Problem-Based Learning (PBL), é relevante destacar a análise de Frezatti et al. (2018), que elucidam de forma clara a relação entre o problema, seu contexto e as hipóteses que envolvem sua origem.

A lógica do desenvolvimento do Problem-based Learning (PBL) está calcada no relacionamento entre o contexto em que o problema se enquadra, o próprio problema e as hipóteses das causas do problema. Esse conjunto permite que os conhecimentos a serem inseridos ou integrados ganhem força quanto a entendimento e aplicação em dado contexto, o que permite ao aluno realmente considerar isso como algo prático. (FREZATTI et al, 2018, p. 22). [9]

Reforçando o assunto mencionado, para Cipolla (2016) essa metodologia ainda abre portas para um novo mundo, onde há diversos caminhos a percorrer, sendo empolgante e inovador no ensino efetivo, uma vez que os alunos participam ativamente, selecionando suas tarefas, demandas e lidando com os problemas do mundo real, podendo, muitas vezes, contribuir com nossa sociedade contemporânea. [6]

Corroborando com essa perspectiva, Walton (1989) relata que os adultos demonstram maior interesse e capacidade de aprendizado quando o contexto de ensino é democrático, ou seja, quando é aberto à livre expressão, ao questionamento e à troca de informações. Nesse ambiente, o aluno se torna o principal receptor de conteúdo, participando ativamente do processo de aprendizagem. Além disso, ele tem a autonomia de aprender de acordo com a abordagem que mais se adequa ao seu ritmo e estilo de aprendizagem, permitindo uma construção mais significativa do conhecimento. [15]

Complementando essa visão centrada na autonomia do discente, Barrows (1986) ainda afirma que a autoavaliação e o aprendizado autodirigido são componentes essenciais para que o estudante se sensibilize para as suas próprias necessidades de aprendizado. Através desses processos, o aluno se torna mais consciente das áreas em que precisa de desenvolvimento, o que o impulsiona a buscar as informações corretas. Além disso, ele aprende a utilizar de forma apropriada as fontes de informação disponíveis, desenvolvendo habilidades críticas e autônomas que são fundamentais para um aprendizado contínuo e eficaz. [2]

C. Origens da Aprendizagem Baseada em Problemas

Em qualquer contexto histórico, é possível identificar fatos e conceitos que fundamentam uma determinada abordagem. Neste estudo, serão explorados os principais conceitos que embasam a metodologia Problem-Based Learning (PBL).

Segundo Engel (1982), a PBL (Aprendizagem Baseada em Problemas) foi implementada no Curso Médico da Universidade de McMaster, localizada em Hamilton, província de Ontário, no Canadá. Essa abordagem inovadora surgiu como uma resposta às limitações do ensino tradicional, que, muitas vezes, não promovia o engajamento ativo dos alunos nem favorecia o desenvolvimento de habilidades práticas. A PBL, por sua vez, prioriza a aprendizagem ativa e centrada na resolução de problemas reais, permitindo que os estudantes se envolvam de forma mais profunda com o conteúdo, enquanto desenvolvem habilidades essenciais, como o pensamento crítico, a autonomia na busca pelo conhecimento e a capacidade de trabalhar em equipe. Desde sua implementação inicial, a metodologia tem sido amplamente adotada em diversas áreas do conhecimento, demonstrando eficácia no desenvolvimento de competências que são fundamentais para a formação de profissionais preparados para enfrentar os desafios do mundo real. [8]

Segundo Barrows (1986), a metodologia Problem-Based Learning (PBL) fundamenta-se em diversos conceitos teóricos que orientam sua aplicação e eficácia no processo de aprendizagem. De acordo com Barrows, o aprendizado se torna mais efetivo quando ocorre em contextos que são semelhantes àqueles que os alunos enfrentarão em sua prática profissional futura. Isso ocorre porque, ao trabalhar com problemas reais e situações práticas, os estudantes têm a oportunidade de desenvolver habilidades que serão essenciais para o seu desempenho no campo profissional, ao mesmo tempo em que compreendem profundamente o conteúdo abordado. [2]

A abordagem mencionada consiste em uma estratégia educacional eficaz para a aquisição de conhecimentos e habilidades, baseada na resolução de problemas propostos. Nesse modelo, a experiência de aprendizagem é organizada por meio do ensino em pequenos grupos, o que permite um ambiente mais interativo e colaborativo entre os alunos. O estudo individual também é priorizado, incentivando o aluno a desenvolver sua autonomia e a aprofundar-se nos temas de forma independente. O docente, por sua vez, desempenha um papel fundamental como facilitador e tutor, orientando o processo de aprendizagem sem assumir o papel de transmissor direto do conhecimento. Dessa forma, a abordagem busca promover o aprendizado ativo e o desenvolvimento de competências essenciais para a prática profissional (BRANDO, 1990). [4]

O processo de aprendizado, ou seja, o caminho do conhecimento, mais do que o conteúdo em si, é valorizado. A fonte básica de aprendizado no PBL é a exposição a situações e problemas semelhantes às experiências reais da futura prática profissional. Os objetivos do PBL são encorajar o envolvimento do estudante em seu próprio processo de aprendizado, orientá-lo a aplicar o conhecimento adquirido em situações práticas e desenvolver habilidades específicas que possibilitem a continuidade de sua educação durante a vida profissional.

II. CONCLUSÃO

O presente artigo teve como propósito aprofundar o conhecimento sobre a metodologia ativa, com enfoque na Problem-Based Learning (PBL), analisando suas contribuições para o processo de ensino-aprendizagem na sociedade contemporânea. Através desta investigação, foi possível observar como a PBL se destaca como uma abordagem eficaz, não apenas no contexto acadêmico, mas também como preparação para desafios práticos enfrentados pelos alunos em suas futuras carreiras profissionais. Ao longo do trabalho, foram apresentados os conceitos fundamentais e o funcionamento dessa metodologia, evidenciando que, por meio dessa abordagem, o ensino se torna mais dinâmico, envolvente e eficaz. A autonomia dos discentes é significativamente ampliada, permitindo que eles assumam um papel ativo e responsável na construção do próprio conhecimento, enquanto o docente atua como facilitador e mediador do processo de aprendizagem.

Os resultados deste estudo evidenciaram que a PBL favorece o engajamento dos estudantes, ao mesmo tempo em que promove o desenvolvimento de habilidades essenciais, como o pensamento crítico, a colaboração, a resolução de problemas complexos e a capacidade de aplicar o conhecimento adquirido em contextos práticos. Isso é especialmente importante, pois prepara os alunos para enfrentarem situações reais que exigem criatividade, análise e trabalho em equipe. Além disso, foi possível perceber que a interação contínua e o diálogo entre docentes e discentes desempenham um papel central na eficácia desta metodologia, sendo um elemento-chave para o sucesso da proposta. Esse processo de troca de conhecimentos e experiências contribui para a formação de um ambiente de aprendizagem mais colaborativo e significativo, essencial para a construção de um aprendizado duradouro e relevante.

Este estudo revelou-se particularmente relevante, pois não apenas contribuiu para a ampliação da compreensão sobre as metodologias ativas, mas também incentivou a reflexão sobre a importância de adaptar as práticas pedagógicas às exigências da sociedade atual.

Ao evidenciar os benefícios da PBL, espera-se que educadores e profissionais de outras áreas possam reconhecer seu grande potencial transformador, sendo capaz de promover práticas pedagógicas mais inovadoras, participativas e alinhadas às necessidades e desafios do mundo contemporâneo. Dessa forma, a adoção da PBL pode ser vista como um caminho promissor para transformar a educação, tornando-a mais centrada no aluno, colaborativa e, acima de tudo, capaz de preparar os alunos para as exigências e desafios do futuro.

REFERÊNCIAS

- [1]ALVES, P.; MORAIS, C.; MIRANDA, L. **Aprendizagem Baseada em Projetos num Curso Técnico Superior Profissional de Desenvolvimento de Software**. *Espaço Pedagógico*, v.26 n. 2, p.423-455. Passo Fundo, maio/ago 2019.
- [2]BARROWS, H. S. *A taxonomy of problem-based learning methods*. *Med. Educ.*, (20): 6, 481-6, 1986.
- [3]BES, P. R. et al. **Teoria da educação**. Porto Alegre: SAGAH, 2020.
- [4]BRANDO, L.A. **Implementing problem-based learning**. *J. Dental Educ.*, (54): 9, 548-9, 1990.
- [5]CAMPOS, A.; MACHADO, G. B.; RADOS, G. J. V.; TODESCO, J. L. **Aprendizagem Baseada em Projetos: Uma Experiência em Sala de Aula para Compartilhamento e Criação do Conhecimento no Processo de Desenvolvimento de Projetos de Software**. *Competência*, v.9, n.2, p.17-35. Porto Alegre, ago/dez 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2025.
- [6]CIPOLLA, L. E. **Resenha do Livro “Aprendizagem Baseada em Projetos: A Educação Diferenciada para o Século XXI”**. *Administração: Ensino e Pesquisa*, v.17, n.3, p.567-585. Rio de Janeiro, set/dez 2016. Disponível em: <https://raep.emnuvens.com.br/raep/article/view/440>. Acesso em: 20 de abril de 2021.
- [7]COLETTI, P. M. C.; BATTINI, O.; MONTEIRO, E. **Tecnologias da Informação e Comunicação e as Metodologias Ativas: Elementos para o Trabalho Docente no Ensino Superior**. *Revista Prática Docente*, v.3, n.2, p.798-812. Instituto Federal de Mato Grosso, Confresa, jul/dez 2018. Disponível em: <http://periodicos.cfs.ifmt.edu.br/periodicos/index.php/rpd/article/view/281>. Acesso em: 7 de março de 2025.
- [8]ENGEL, C. E. *Medical Teacher*. **Edinburgh: Church Livingstone**, 1982.
- [9]FREZATTI, F. et al. **Aprendizagem baseada em problemas (PBL): uma solução para aprendizagem na área de negócios**. São Paulo: Atlas, 2018.
- [10]MOTA, A.; WERNER DA ROSA, C. **Ensaio sobre metodologias ativas: reflexões e propostas**. *Revista Espaço Pedagógico*, v. 25, n. 2, p. 261-276, 28 maio 2018.
- [11]OLIVEIRA, Evaneide B. **Aprendizado Baseado em Problemas (Problem-Based Learning): a sua importância no ensino da Contabilidade**. 2010. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis e Financeiras), Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [12]PARKER, J. L. **Students' Attitudes Toward Project-Based Learning in an Intermediate Spanish Course**. *International Journal of Curriculum and Instruction*, v.12, n.1, p.80-97, 2020. Disponível em: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1249547.pdf>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2025.
- [13]PISCHETOLA, M.; MIRANDA, L. T. **Metodologias Ativas: Uma Solução Simples para um Problema Complexo**. *Revista Educação e Cultura Contemporânea*, v.16, n.43, 2013. Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://periodicos.estacio.br/index.php/reeduc/article/viewArticle/5822>. Acesso em: 7 de março de 2025.

[14]SCHEFFER, M. A.; LUNARDI, G. M. **Integração de metodologias ativas da aprendizagem na formação policial: gamificação e educação em direitos humanos**. In: TEIXEIRA, Clarissa Stefani.; SOUZA, Márcio Vieira de. (Org.). *Educação fora da caixa: tendências internacionais e perspectivas sobre a inovação na educação*. São Paulo: Blucher, 2018. p. 84 - 109.

[15]WALTON, H. J.; MATTHEWS, M. B. *Essentials of problem-based learning*. *Med. Educ.*, (23): 6, 542-58, 1989.

AUTORES



Leonardo Henrique de Almeida Pedro

Estudante do curso Bacharelado em Psicologia na Faculdade Unis São Lourenço, membro do Conselho Superior e do Conselho de Avaliação Própria da instituição. Possui experiência em Análise do Comportamento Aplicada, atua como estagiário de professor de apoio na rede pública de ensino e, atualmente,

desenvolve um projeto de pesquisa na Iniciação Científica sobre O Uso Excessivo da Tecnologia no Ensino Superior.



Daianna Brasilio de Araujo Pompeu

Avaliadora de Curso do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais, INEP/MEC, Brasil. Doutora em Ciências da Linguagem pela UNIVÁS; Mestra em Letras - Linguagem, Discurso e Cultura pela UNINCOR. Possui graduação em LETRAS (2002) e PEDAGOGIA (2011), além de especialização nas áreas de Psicopedagogia, Supervisão Escolar, Artes e Metodologias Ativas. Atualmente

é professora adjunta da FUPAC - Baependi/MG; FUSAL - São Lourenço/MG e COLÉGIO FRANCISCANO SANTO INÁCIO - Baependi/MG. Tem experiência na área de Educação, com ênfase em Língua Portuguesa, Literatura, Artes e Conteúdos Pedagógicos. Atua também na área de revisão de textos acadêmicos e literários.



Roger Antonio Rodrigues

Mestre em Engenharia de Produção (2017) pela Universidade de Araraquara, possui MBA em Lean Manufacturing, possui especialização em Qualidade e Produtividade. Graduado em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário de Formiga (2010). Possui experiência em indústria na área de PCP e Logística. Possui experiência com projetos de inovação

em pequenas, médias e grandes empresas. Possui experiência com formação de professores. Fez parte do grupo de estudo e pesquisa em Metodologias Ativas de 2014 a 2018 do Grupo UNIS-MG. Palestrante nas áreas de Planejamento e Controle da Produção, Racionalização Industrial, Qualidade, Liderança e

Inovação. Atualmente é diretor acadêmico da Faculdade Unis São Lourenço, professor titular e membro do colegiado/NDE do curso de Engenharia de Produção EaD no Grupo Unis e professor da pós-graduação do Grupo Unis.



Larissa Ferreira Dias Leite

Psicóloga graduada pela Universidade Federal de São João Del-Rei (2012), especialista em Administração: MBA em Gestão Estratégica de Pessoas pela Universidade Federal de São João Del-Rei (2014) e mestra pelo Programa de Promoção à Saúde e Prevenção à Violência da Faculdade Medicina da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), cuja dissertação é intitulada

"Cadê o sujeito que estava aqui? Contribuições da psicanálise sobre a permanência das pessoas em situação de rua no campo da Política de Assistência Social". Atualmente é membro do Quadro de Oficiais da Saúde na política de segurança pública do estado de Minas Gerais. Atua, também, com a psicologia clínica e é docente na graduação de Psicologia na Faculdade Unis São Lourenço, no sul de Minas Gerais.

Uma Plataforma de Gestão de Projetos de Moedas Sociais Digitais (MSD) indexadas, integrada a uma *Blockchain* Pública com protocolo de consenso LPoS (*Lease Proof of Stake*)

Inocêncio Avelino Padilha , Katyusco de Farias Santos

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação (PPGTI) - Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

CEP: 58.015-435 - João Pessoa - PB - Brasil

inocencio.avelino@academico.ifpb.edu.br, katyusco.santos@ifpb.edu.br

Abstract. *Social Currencies emerge as an innovative regional economic tool, driving development and social inclusion in areas with limited economic and social progress, expanding access to credit in these regions. Through Blockchain technology, the implementation of Digital Social Currencies (DSC) becomes viable, promoting the sustainable digitization of Social Currency initiatives in Brazil. This work details the design of the DSC management platform, integrated with blockchain technology through a public network called MDMCOIN that uses the Leased Proof of Stake (LPoS) consensus protocol, presented through BPMN diagrams, focusing on creating a web platform for integrating Social Currency projects, highlighting the strength and innovation of the proposed platform.*

Resumo. *As Moedas Sociais emergem como uma ferramenta econômica regional inovadora, impulsionando o desenvolvimento e a inclusão social em áreas com limitado progresso econômico e social, ampliando o acesso ao crédito nessas regiões. Através da tecnologia Blockchain, a implementação de Moedas Sociais Digitais (MSD) se torna viável, promovendo a digitalização sustentável das iniciativas de Moedas Sociais no Brasil. Neste trabalho detalha-se a concepção da plataforma de gestão das MSDs, integrado a tecnologia blockchain através de uma rede pública denominada MDMCOIN que utiliza o protocolo de consenso Leased Proof of Stake (LPoS), apresentada por meio de diagramas BPMN, com foco na criação de uma plataforma web destinada à integração de projetos de Moedas Sociais, evidenciando a solidez e a inovação da plataforma proposta.*

1. Introdução

As moedas sociais são ferramentas importantes para promover a economia local e a circulação da riqueza produzida no próprio território onde são implantadas, estimulando o comércio entre os membros da comunidade. As moedas sociais contribuem para a inclusão produtiva e financeira dos indivíduos que eventualmente ficam às margens do sistema financeiro tradicional, proporcionando o acesso a serviços bancários básicos para aqueles que não possuem conta em bancos [RIGO 2014].

Os projetos de Moedas Sociais como visto em [Rigo 2014] e [Monteiro, Silva e Luna 2018], estimulam o associativismo e o cooperativismo entre os membros da comunidade através do estímulo às

trocas locais com base na moeda social, contribuindo para a autonomia financeira das comunidades e o fortalecimento da economia solidária por meio do fomento a pequenos empreendedores locais e da geração de renda compartilhada.

A primeira iniciativa de um Banco Comunitário de Desenvolvimento (BCD) no Brasil ocorreu no ano de 1998 através do Banco Palmas, sendo criada a moeda Palmas em 2002. Esse projeto teve importante papel social na sua fase inicial no Conjunto Palmas em Fortaleza, Ceará, onde foi desenvolvido. No entanto, o projeto da moeda social Palmas cumpriu o seu papel social e é observado atualmente o desuso da moeda pela comunidade local [RIGO, FRANÇA 2017].

Apesar das moedas sociais possuírem extrema importância nas comunidades, existem limitações nos moldes como elas são desenvolvidas e considerando os trabalhos de [Rigo e França 2017], entre essas restrições podemos destacar os seguintes pontos:

- Limitação geográfica, pois seu alcance e uso está restrito ao território onde foi implementada, dificultando sua expansão para outros locais;
- Problemas relacionados à segurança, já que as cédulas físicas estão sujeitas a roubos, extravios e falsificações;
- Falta de controle e transparência sobre as transações realizadas, dificultando a fiscalização e auditoria do sistema pela própria comunidade;
- Grande dependência de notas e moedas físicas, aumentando custos de produção, armazenamento e manuseio;

Devido às limitações tecnológicas das moedas sociais físicas, como o armazenamento e circulação manual dos papéis-moeda, essas iniciativas enfrentam desafios de escalabilidade e operação à medida que as comunidades crescem. Como uma das possíveis soluções para digitalizar esses ativos é possível propor o uso da tecnologia *blockchain*.

A tecnologia *blockchain* teve como principal ponto de aplicação a criação da criptomoeda Bitcoin em 2008, quando o pseudônimo Satoshi Nakamoto publicou o white paper "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System", [Nakamoto 2008]. Neste documento, Nakamoto propôs a criação de um sistema de pagamento eletrônico descentralizado que funcionaria através de uma rede ponto-a-ponto, sem a necessidade de uma entidade central controladora.

A ideia central por trás do Bitcoin era o uso de uma "*blockchain*", ou cadeia de blocos, que permitiria registrar transações de forma descentralizada, transparente e imutável através da rede. Posteriormente, em 2014, Vitalik Buterin publicou o conceito de "Ethereum" e introduziu a funcionalidade de "contratos inteligentes" na *blockchain*, de acordo com, [Wood 2014]. Contratos inteligentes podem ser definidos como pedaços de código que são armazenados, executados e verificados em uma rede *blockchain*.

Os contratos inteligentes, apesar de terem sido conceitualizados por Nick Szabo em 1996 no artigo "*Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets*", tiveram a sua integração prática com a tecnologia *blockchain* anos depois com a criação da rede do Ethereum.

Szabo definiu contratos inteligentes como pedaços de código que armazenam regras de negócio ou termos de um acordo entre partes de forma a facilitar, verificar ou executar o acordo. Ele já

vislumbrava a possibilidade de os contratos inteligentes serem armazenados e executados de maneira descentralizada através da validação por múltiplos peers (participantes) de uma rede [SZABO 1996].

Posteriormente a criação da *blockchain* Ethereum outros projetos que utilizam a tecnologia de contratos inteligentes surgiram, entre esses projetos podemos destacar o protocolo WAVES que se baseia no protocolo de consenso Leased Proof of Stake (LPoS) que tem sua origem no protocolo Proof of Stake (PoS) . Diferente do Proof of Work utilizado no Bitcoin, o (PoS) faz com que a chance de um nó gerar o próximo bloco seja proporcional à sua participação econômica na rede, ou seja, quanto maior a quantidade de tokens WAVES, que são ativos digitais programáveis que habilitam aplicativos descentralizados a serem executados em *blockchain*, em sua carteira, maiores as chances de validar transações na rede [WAVES TECH 2016].

Baseado na tecnologia integrada ao protocolo WAVES um grupo de desenvolvedores brasileiros integrados a plataforma **SpeedWebdesigner.com** criaram a rede *blockchain* da MDMCOIN. O foco dessa rede é tornar a tecnologia blockchain acessível e de forma pública através de *Application Programming Interface* - API para qualquer pessoa ou organização ao redor do mundo e de forma descentralizada e com o menor custo.

Inicialmente a rede da MDMCOIN *Blockchain* realizou a emissão de 210 milhões de unidades, sendo o ativo principal desta rede, com um saldo em carteira de ao menos duas moedas e utilizando as APIs descentralizadas desta rede é possível a emissão rápida de tokens customizados representativos de diversos ativos [MDMCOIN 2024]. Os tokens podem ser negociados de maneira descentralizada utilizando plataformas criadas pela equipe de desenvolvedores do projeto ou através de sistemas descentralizados integrados às APIs públicas desta *blockchain* por qualquer outro desenvolvedor. Através da integração tecnológica na rede da MDM, torna-se viável a criação de tokens e a vinculação de moedas sociais digitais a ativos tangíveis do mundo real, tais como ouro, prata, petróleo, moedas fiduciárias, ações de empresas e diversos outros ativos.

A proposta deste artigo é caracterizar a implantação da Plataforma MSD e gerar a possibilidade de contribuir para a profissionalização e gerenciamento de projetos de moedas sociais no Brasil de forma pública e promovendo a integração dessas iniciativas a tecnologia *blockchain*, aproximando essa tecnologia do dia a dia das comunidades beneficiadas com os projetos de moedas sociais vinculados à plataforma.

2. Contextualização

2.1. Blockchain

A *Blockchain* é um sistema de banco de dados que gera a possibilidade de compartilhamento de informações de forma transparente e pública, sem colocar em risco a violação desses dados. Todos os blocos desse banco de dados representa um conjunto de transações que são ligadas através de cadeia e registradas de forma cronológica, desta forma não é possível modificar um elo da cadeia sem o consenso de toda a rede, desta forma é possível criar milhares de aplicações que necessitam de ações que não podem ser excluídas ou alteradas (AWS AMAZON, 2022).

A Figura 1 retrata uma rede *blockchain* composta por diversos cubos interconectados, representando os participantes ativos de uma rede. Alguns cubos são destacados como nós validadores

ou mineradores, responsáveis por verificar e validar as transações que entram na *blockchain*. Esses nós possuem uma função crítica na garantia da segurança e integridade das transações na rede.

Além dos nós validadores ou mineradores, há outros cubos na figura que representam participantes regulares na rede. Esses participantes têm a capacidade de enviar transações para serem validadas pelos nós validadores ou mineradores. Eles desempenham um papel essencial ao enviar e solicitar a validação de transações, contribuindo para a dinâmica e funcionamento da *blockchain*. A figura ilustra a importância da cooperação entre os diferentes atores na rede para garantir a confiabilidade e a eficiência de uma rede *blockchain*.

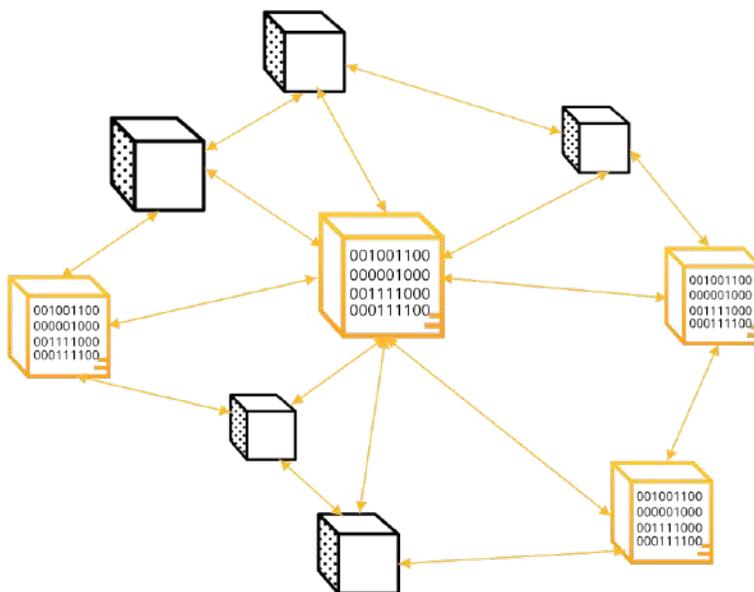


Figura 1. Integração entre participantes de uma rede *Blockchain* - Elaborada pelos autores

Entre as principais *Blockchain's* públicas que utilizam o processo de mineração (PoW), podemos destacar o Bitcoin (BTC), Litecoin (LTC), DogeCoin (DOGE) e Ethereum Classic (ETC), sendo este processo realizado através de máquinas com enormes quantidades de CPUs (*Central Processing Unit*) ou GPUs (*Graphics Processing Units*) (ETHEREUM, 2023; BINANCE ACADEMY, 2023).

Cerca de 0.6% de toda a energia produzida no mundo será utilizada no processo de mineração (PoW - *Proof of Work*) apenas da moeda digital BITCOIN (Jiang, S., Li, Y., Lu, Q. et al., 2021), o que representa o consumo equivalente ao da Noruega, um país com cerca de 5.4 Milhões de habitantes (BANCO MUNDIAL, 2022).

Para reduzir os impactos gerados pela mineração do tipo PoW, existem algumas alternativas sustentáveis, entre as quais podemos destacar o (PoS - *Proof of Stake*), este processo de validação possui o mesmo nível de segurança que o processo PoW, mas as validações são realizadas por nós validadores que precisam ter no saldo de suas carteiras digitais valores específicos. Por exemplo, a *blockchain* da Ethereum 2.0 (ETH2) exige que um validador tenha no mínimo 32 ETH de saldo em sua carteira (ETHEREUM, 2024).

A utilização da tecnologia *Blockchain* pode aprimorar a gestão e a segurança das transações envolvendo moedas sociais, aumentando a confiança e a eficiência desses sistemas financeiros

comunitários. Ao explorar alternativas sustentáveis, como os modelos de validação por *Proof of Stake* (PoS), é possível mitigar os impactos ambientais associados à mineração intensiva de algumas *Blockchains*, contribuindo para um ecossistema mais equilibrado e responsável.

2.2. Moedas Sociais

Atualmente, as moedas desempenham um papel crucial na economia global, sendo utilizadas como meio de troca em transações comerciais, reserva de valor e unidade de conta. Além das moedas nacionais, as moedas sociais que se baseiam na economia solidária surgem como alternativas econômicas regionais que buscam promover o desenvolvimento local e a inclusão social, demonstrando a diversidade de formas de organização monetária e a importância da moeda como instrumento de interação econômica e social (SANCHES, MORAES E TOLEDO, 2022).

A economia solidária representa um campo que vai além das práticas meramente mercantis, permitindo a visualização de diferentes formas de interdependência entre os princípios econômicos fundamentais. Ao integrar um grande número de práticas que, à primeira vista, são de natureza mercantil, a economia solidária opera em sintonia com intervenções públicas (RIGO, 2014).

A economia popular e a economia solidária se entrelaçam em práticas que refletem a importância da interdependência e da mobilização dos princípios econômicos para promover o desenvolvimento e a sustentabilidade em comunidades marginalizadas (RIGO, 2014).

A interseção entre moedas tradicionais, moedas sociais e criptomoedas reflete a diversidade de opções disponíveis para transações financeiras e a importância de adaptar as práticas econômicas às necessidades e realidades de diferentes comunidades.

2.3. Bancos Comunitários de Desenvolvimento (BCDs)

Os Bancos Comunitários de Desenvolvimento (BCD) são instituições financeiras locais que desempenham um papel fundamental no fortalecimento das comunidades de baixa renda. Baseados em princípios de solidariedade e cooperação, os BCDs atuam como catalisadores para o desenvolvimento econômico e social, oferecendo serviços financeiros acessíveis e promovendo a inclusão financeira.

De acordo com [Monteiro, Silva e Luna 2018] a conceituação sobre Bancos Comunitários no Brasil é rudimentar e apenas passou a ser vista a partir do momento que o Instituto Palmas se uniu com a extinta Secretaria Nacional de Economia Solidária - SENAES, através dessa união foi definido que a Economia Solidária é distinta de subsistência desde a produção até as relações de comércio ou de permuta, nesta economia os empregados são também os donos do negócio.

Uma das notáveis iniciativas voltadas para o fomento da Economia Solidária é a Incubadora Tecnológica de Empreendimentos Solidários - INCUTES, vinculada ao Instituto Federal da Paraíba. Seu principal objetivo consiste em oferecer suporte e consultoria a grupos produtivos e empreendimentos interessados em atuar de forma colaborativa, seguindo os princípios da Economia Solidária. Essa ação ilustra a sinergia entre instituições de ensino na promoção de uma economia mais equitativa, com vistas à redução dos índices de exclusão social no Brasil [INCUTES 2024].

A figura 2 a seguir tenta demonstrar não apenas a interligação entre os Bancos Comunitários de Desenvolvimento e as instituições financeiras comprometidas com a inclusão e o apoio comunitário,

mas também destaca a sinergia entre esses agentes em prol de um objetivo comum: fortalecer as bases da economia solidária.



Figura 2. Bancos integrados a Moedas Sociais Circulantes - Elaborada pelos autores.

3. Trabalhos Relacionados

O desenvolvimento de plataformas digitais para moedas sociais pode ampliar o alcance destas moedas em diferentes territórios, conforme discutido por (ORZI, PORCHEROT E VALDECANTOS, 2021). De acordo com os autores, a tecnologia *blockchain* permite a criação de ativos digitais que possibilitam uma maior escalabilidade e acessibilidade das moedas sociais em comparação com o formato analógico (ORZI, PORCHEROT E VALDECANTOS, 2021).

O trabalho “*Cryptocurrencies for social change: the experience of Monedapar in Argentina*”, estudar as características e potencialidades das moedas sociais digitais que operam em *blockchain*, analisar a experiência da *MonedaPAR* na Argentina como um sistema de moeda social digital baseado em crédito mútuo e *blockchain*, explorando as questões de confiança, governança e descentralização.

O trabalho também investigou a interseção entre tecnologia e moedas sociais, examinando como a fusão de criptomoedas e valores sociais pode contribuir para a criação de uma sociedade mais inclusiva e sustentável, o trabalho também permite compreender o funcionamento da *MonedaPAR* como uma moeda mutualista que replica a estrutura de sistemas monetários convencionais, mas com a inovação de uma contabilidade pública e unificada na *blockchain*, permitindo trocas P2P e promovendo a solidariedade e reciprocidade nas transações.

No Brasil a migração das moedas sociais para o meio digital apresenta diversas vantagens, como a facilidade de uso, a agilidade nas transações e a possibilidade de alcance de um público mais amplo. Além disso, a digitalização das moedas sociais pode contribuir para a inclusão financeira, permitindo que mais pessoas participem ativamente da economia local.

CERNEV, A. K., & DINIZ, E. (2019) no trabalho “Palmas para o E-Dinheiro! A Evolução Digital de uma Moeda Social Local” aborda um tema relevante e atual sobre a transição das moedas sociais analógicas para o ambiente digital. A transformação para o ambiente digital também traz desafios, como a necessidade de garantir a segurança das transações, a proteção dos dados dos usuários e a manutenção dos princípios de transparência e confiança que são fundamentais para as moedas sociais.

4. Plataforma Proposta

4.1. Recursos da Plataforma

A proposta do trabalho tem como principal aplicabilidade integrar a tecnologia *blockchain* às atividades de projetos de moedas sociais, a forma como a tecnologia *blockchain* será integrada gerando a possibilidade de criação de múltiplas moedas sociais digitais em uma única plataforma integrada a uma *blockchain* pública é uma ação pioneira no Brasil, esse processo irá possibilitar a execução dos seguintes pontos:

- Registro de transações comerciais de forma descentralizada, transparente e imutável entre essas organizações e seus clientes/usuários. Isso trará mais eficiência, interoperabilidade e histórico de dados para análises.
- Emissão e gestão de moedas sociais digitais lastreadas em ativos reais, permitindo sua circulação em comunidades específicas de forma inclusiva e promotora do desenvolvimento local.
- Tokenização de produtos e serviços desses empreendimentos em forma de criptoativos nativos (*tokens* e NFTs), viabilizando novas formas de comercialização, financiamento coletivo e fidelização de clientes.

A solução por meio de plataforma web pública visa suprir a necessidade de pequenas organizações de baixo porte terem acesso facilitado às potencialidades da tecnologia *blockchain*. Sua aplicação se dará inicialmente em projetos piloto envolvendo moedas sociais e microempreendedores locais, podendo ser escalada a nível nacional conforme sua adoção e amadurecimento.

A solução também permitirá responder ao problema ambiental causado por outras *blockchains* ao utilizar o protocolo *LPoS*, promovendo casos concretos de uso sustentável dessa tecnologia para empoderamento socioeconômico.

Através de um diagrama BPMN (*Business Process Model and Notation*) vinculado a figura 3 é possível organizar visualmente utilizando formas, conectores e outros símbolos os processos e funcionalidades da plataforma MSD.

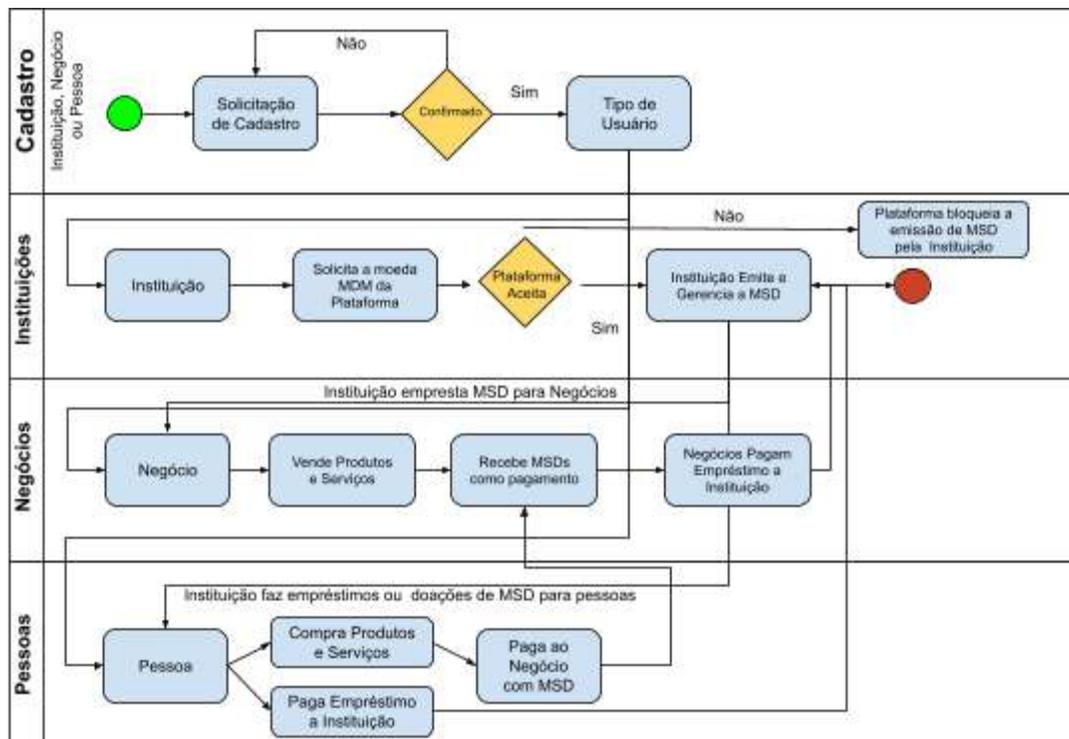


Figura 3. Diagrama de Fluxo BPMN da Plataforma MSD - Elaborada pelos autores.

4.2. Integração com uma Blockchain Pública LPoS

A Plataforma MSD visa integrar diversas funcionalidades da *blockchain* MDMCOIN de forma a viabilizar suas operações de maneira segura, transparente e eficiente.

Para isso, faz-se uso da API's pública da rede, que disponibiliza métodos para acesso a dados e execução de transações. Por meio da API, é possível realizar operações como:

- Criação e gestão de carteiras digitais para os usuários, permitindo o envio, recebimento e armazenamento de ativos na *blockchain*.
- Emissão, transferência e rastreabilidade dos *tokens* representativos das moedas sociais dentro da rede descentralizada.
- Consulta ao histórico de transações para análise do fluxo financeiro entre os membros das comunidades.

As principais API's utilizadas na integração da plataforma MSD e integradas a MDM *Blockchain* foram as seguintes:

- **NODES MDMCOIN**

A API de NODES da rede MDMCOIN possibilita que desenvolvedores tenham acesso a todas as funcionalidades integradas a *blockchain* da MDM de forma pública e descentralizada, permitindo que

qualquer requisição realizada através desta API utilizando o formato *JavaScript Object Notation - JSON*, seja respondida por qualquer nó público de forma aleatória e que estejam integrados a rede.

As requisições integrada a API de NODES é a forma mais eficiente de realizar as integrações diante da rede da MDMCOIN *Blockchain* e sendo de essencial importância para a segurança, escalabilidade e estabilidade da rede, esta API pode ser ativa por qualquer nó da rede e facilita o acesso às funcionalidades por desenvolvedores.

A API de NODES oficial da rede MDMCOIN pode ser acessada através do seguinte endereço público: <https://nodes.mdmcoin.com>.

- **MDMCOIN DATA Service**

A API DATA Service da rede MDMCOIN permite que desenvolvedores realizem as principais requisições na rede *blockchain* como a criação de carteiras, verificação de depósitos e envio de transações de forma simplificada através de qualquer linguagem de programação com suporte a troca de dados utilizando o formato *JavaScript Object Notation - JSON*.

A API pode ser acessada através do seguinte endereço: <https://apidata.mdmcoin.org>. Desta forma, as API's possibilitam que a plataforma digitalize processos e traga benefícios da tecnologia *blockchain* para as iniciativas de moedas sociais de forma transparente e auditável.

5. Discussão

Através do trabalho desenvolvido e da plataforma web criada, será possível integrar o potencial da tecnologia blockchain para aplicações de moedas sociais no Brasil e no Mundo, considerando sua capacidade de promover transparência, segurança e descentralização. Isso poderá ajudar a determinar de que forma a *blockchain* pode apoiar o desenvolvimento sustentável dessas iniciativas e promover a inclusão socioeconômica.

Realizou-se também uma análise comparativa dos custos para validar transações na rede da MDMCOIN *blockchain*, em comparação com as principais *blockchains* públicas que permitem a criação de tokens e contratos inteligentes, como Binance Smart Chain (BSC), Ethereum (ETH) e Tron (TRX), não foi feita a análise de outras redes blockchains públicas que utilizam a tecnologia PoW devido aos custos que seriam necessários para manter uma estruturas de mineração ativa com equipamentos com custos elevados diante das comunidades beneficiadas com o projeto, se fosse necessário ativar um nó público neste tipo de rede *blockchain*.

Após a análise dos custos de transação de envio de 1 (uma) unidade de moeda nas redes blockchain mencionadas, observa-se que a rede da MDM se destaca significativamente em termos de eficiência e economia. Comparando com as redes ETH, TRX e BSC, os custos de transação na rede da MDM são drasticamente menores, representando uma economia de até 5.000.000.000% em relação à ETH, mais de 100.000% em relação à TRX e cerca de 50.000% em relação à BSC. Essa disparidade de custos torna a rede da MDM altamente atrativa, especialmente para instituições ligadas a Bancos Comunitários, garantindo uma estrutura de transação viável e eficaz para suas operações.

A figura 4 a seguir ilustra a tela de cadastro inicial da plataforma MSD que pode ser acessada através do endereço público, <https://msd.moedassociais.org>.

The image shows a registration form for the MSD platform. At the top, there is a logo for 'MSD MOEDAS SOCIAIS DIGITAIS'. Below the logo, the word 'Cadastro' is displayed in a bold, black font. The form consists of several sections: 1. 'Tipo de Conta' with three radio buttons: 'Organização' (which is selected), 'Negocio', and 'Pessoa'. 2. A text input field labeled '* Nome'. 3. A text input field labeled '* CNPJ / CPF'. 4. A text input field labeled '* Celular *'. 5. A text input field labeled '* Codigo Postal - CEP'.

Figura 4. Tela de Cadastro da Plataforma MSD - Plataforma MSD

6. Considerações Finais

Este estudo proporciona uma análise profunda da Plataforma MSD, destacando a integração de Moedas Sociais por meio da Tecnologia blockchain de maneira descentralizada em uma rede pública. Apresenta uma estrutura inovadora para a incorporação de projetos de moedas sociais no Brasil e no cenário global, utilizando a tecnologia blockchain como base. A plataforma MSD exemplifica o potencial de aplicações que podem ser desenvolvidas por meio das APIs públicas da rede blockchain da MDMCOIN.

Como direcionamentos para futuras pesquisas, sugere-se a exploração de outras redes blockchain, incluindo as permissionadas, e a avaliação de protocolos adicionais que possam aprimorar o processo de criação de moedas sociais digitais com custos reduzidos, simplificação operacional e garantia de segurança e transparência para as comunidades beneficiadas pelos projetos de moedas sociais no Brasil. Essas investigações podem contribuir significativamente para o avanço e a eficácia das iniciativas de moedas sociais digitais, fortalecendo sua implementação e impacto positivo sobre as comunidades envolvidas.

Referências

- BNB Smart Chain Gas Tracker. <https://bscscan.com/gastracker>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024..
- BINANCE COIN PRICE. BNB price today, BNB to USD live price, marketcap and chart | CoinMarketCap, 2024. <https://coinmarketcap.com/currencies/bnb/>. Acesso em: 30 de Agosto de 2024.
- CERNEV, A. K., & DINIZ, E. (2019). Palmas para o E-Dinheiro! A Evolução Digital de uma Moeda Social Local. Revista de Administração Contemporânea. <https://www.scielo.br/j/rac/a/n3TkXYtmk8kqRBXvrdxSp9c/?lang=pt>. Acesso em: 24 de Outubro de 2024..

- COINTELEGRAPH, (2023). Leased proof-of-stake (LPoS), explained. <https://coingecko.com/en/explained/leased-proof-of-stake-lpos-explained>. Acesso em: 26 de Outubro de 2024.
- ETHERSCAN. Ethereum Gas Tracker. <https://etherscan.io/gastracker>. Acesso em: 24 de Outubro de 2024.
- ETHEREUM PRICE. Ethereum price today, ETH to USD live price, marketcap and chart | CoinMarketCap, 2024. <https://coinmarketcap.com/currencies/ethereum/>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024.
- FARIA, Luiz Arthur S.; SEVERO, Fernando G.; CUKIERMAN, Henrique L.; DINIZ, Eduardo H. (2019). Digitalizações de moedas sociais brasileiras e desafios de governanças comunitárias : os requisitos, os códigos e os dados. <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9956>. Acesso em: 23 de Outubro de 2024.
- FERNANDES, André Luis Milagres. (2018). FATORES QUE INFLUENCIAM A INTENÇÃO DE USO DA MOEDA SOCIAL DIGITAL: UM EXPERIMENTO DE CAMPO. FGV SB. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/24533>. Acesso em: 23 de Outubro de 2024.
- INCUTES, (2024). Incubadora Tecnológica de Empreendimentos Solidários. <https://www.ifpb.edu.br/proexc/extensao-popular-e-rural/incutes-1>. Acesso em: 23 de Outubro 2024.
- Jiang, S., Li, Y., Lu, Q. et al (2021). Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China. Nat Commun 12, 1938 (2021). Nature Communications. <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22256-3>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024.
- Largest Blockchains. COINMARKETCAP, 2024. Disponível em: <https://coinmarketcap.com/chain-ranking/>. Acesso em: 01 de Fev. de 2024.
- PADILHA Inocência. A, Santos, KATYUSCO de F. (2023). MDMCOIN - INTEGRANDO A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN A PEQUENOS NEGÓCIOS E MOEDAS SOCIAIS. 5º SIMPIF - IFPB. <https://eventos.ifpb.edu.br/index.php/v-simpif/v-simpif/paper/view/4444/663>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024.
- MDMCOIN (2024), MDMCOIN - A Blockchain integrada a Produtos e Serviços. <https://mdmcoin.com>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024.
- MDMCOIN PRICE. MDMCOIN (MDM) Price - Live Chart, Index, Market Cap | CoinPaprika, 2024. Disponível em: <https://coinpaprika.com/coin/mdm-mdmcoin/>. Acesso em: 30 de Ago. de 2024.
- MONTEIRO, Walter Mateus da Silva; SILVA, Ana, Caroline Santos; LUNA, Taianan Alves Uzeda. (2018). MOEDA SOCIAL: UMA ANÁLISE SOBRE SEU IMPACTO NA COMUNIDADE DE SANTIAGO DO IGUAPE – BA. REVISTA FORMADORES. <https://adventista.emnuvens.com.br/formadores/article/view/1028>. Acesso em: 24 de Outubro de 2024.
- NAKAMOTO, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 26 de Outubro de 2024.
- ORZI, Ricardo; PORCHEROT, Raphaël; VALDECANTOS, Sebastian. (2021). Cryptocurrencies for social change: the experience of Monedapar in Argentina. International Journal of Community Currency Research. Vol. 25, No. 1. pp. 16-33. <https://vbn.aau.dk/en/publications/cryptocurrencies-for-social-change-the-experience-of-monedapar-in>. Acesso em: 24 de Outubro de 2024.
- SZABO, N. Smart contracts: building blocks for digital markets. Extropy, v. 16, p. 1-16, 1996.
- SANCHES, Bruno; MORAES, Trícia; TOLEDO, Júlio. (2022). Quando moedas sociais e criptomoedas se encontram: pensando a economia solidária através do blockchain. FGV - RIC - Revista de Iniciação Científica. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/ric/article/view/88331>. Acesso em: 24 de Outubro de 2024.
- RIGO, Ariádne Scalfoni; FRANÇA, Genauto Carvalho de. (2017) O paradoxo das Palmas: análise do (des) uso da moeda social no “bairro da economia solidária”. Cadernos EBAPE. BR, v. 15, p.

- 169-193. <https://www.scielo.br/j/cebape/a/xkJX7X738ByCfDLXW8KFKjc/?lang=pt>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024..
- RIGO, Ariádne Scalfoni. (2014) Moedas sociais e bancos comunitários no Brasil: aplicações e implicações, teóricas e práticas. UFBA. <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/23908>. Acesso em: 25 de Outubro de 2024.
- RODRIGUES, Denis Alves; MEIRELLES, Fernando de Souza; CUNHA, Maria Alexandra V. C. da; DINIZ, Eduardo Henrique. (2018). Benefícios do Blockchain para Moedas Sociais Digitais. RESEARCHGATE. https://www.researchgate.net/publication/325385551_Beneficios_do_Blockchain_para_moedas_sociais_digitais. Acesso em: 24 de Outubro de 2024.
- TRONSCAN. Wallet Tronscan. TRONSCAN, c2023. <https://tronscan.org/#/wallet>. Acesso em: 23 de Outubro de 2024.
- TRON PRICE. TRON price today, TRX to USD live price, marketcap and chart | CoinMarketCap, 2024. <https://coinmarketcap.com/currencies/tron/>. Acesso em: 23 de Outubro de 2024.
- WOOD, G. Ethereum: A Secure Decentralized Generalized Transaction Ledger. Ethereum Project Yellow Paper, 2014.
- WAVES TECH. WAVES whitepaper. MEDIUM. (2016). Waves Tech. <https://medium.com/wavesprotocol/waves-whitepaper-164dd6ca6a23>. Acesso em: 24 de Outubro de 2024.

Desenvolvimento de aplicativo web para terapia de pacientes com lesão neurológica na fala e memorização

Marcela de Cássia Ribeiro, Sabrina Ramos Silveira, Prof. Filipe B. Vilela, Rita Elizabeth Santos de Almeida, Prof. Elisa Renno
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
marcela.ribeiro@ges.inatel.br, sabrina.ramos@ges.inatel.br, filipe.bueno@inatel.br, rita.elizabeth@geb.inatel.br, elisa.renno@inatel.br

Abstract—This project is a web application for patients who have suffered neurological injuries, especially those facing difficulties with speech and memory. It assists in treatment in an accessible, efficient, and personalized way, using technology and remote monitoring. As a result, the patient does not rely on in-person consultations to continue performing daily exercises, improving the recovery process.

Index Terms—Web application, neurological injuries, remote monitoring, daily exercises.

Resumo—Este projeto é um aplicativo web para pacientes que sofreram lesões neurológicas, especialmente aqueles que enfrentam dificuldades na fala e na memorização. Ele auxilia no tratamento de forma acessível, eficiente e personalizada, utilizando tecnologia e acompanhamento remoto. Com isso, o paciente não depende de uma consulta presencial para continuar realizando os exercícios diários, melhorando o processo de recuperação.

Palavras chave—Aplicativo web, lesões neurológicas, acompanhamento remoto, exercícios diários.

I. INTRODUÇÃO

Lesões neurológicas, como acidentes vasculares cerebrais (AVC), traumatismos cranioencefálicos (TCE) ou doenças neurodegenerativas, afetam significativamente a fala e a comunicação. Dessa forma, essas condições comprometem a capacidade de expressão, compreensão da linguagem e, muitas vezes, a memória, afetando diretamente a interação social e a qualidade de vida desses indivíduos. [1]. A reabilitação fonoaudiológica é essencial nesses casos, pois visa restaurar e melhorar as funções de fala, voz, linguagem e deglutição. A base científica da terapia está na neuroplasticidade — a capacidade do cérebro de reorganizar-se formando novas conexões neurais, fundamental para a recuperação de habilidades perdidas ou prejudicadas [2]. A prática diária de exercícios fonoaudiológicos é crucial para maximizar os resultados terapêuticos, promovendo a consistência necessária para o desenvolvimento de novas conexões sinápticas e a recuperação gradual das habilidades de comunicação [3].

Estudos mostram que programas terapêuticos intensivos e regulares favorecem a recuperação funcional. A prática contínua permite que os pacientes aprimorem habilidades linguísticas, reduzam déficits de comunicação e desenvolvam estratégias compensatórias para lidar com as limitações decorrentes das lesões. Além disso, a intervenção precoce em casos de comprometimento neurológico minimiza o risco de agravamento das condições e melhora significativamente os resultados a longo prazo [4].

Atualmente, a maioria dos tratamentos fonoaudiológicos é realizada de forma presencial, com o acompanhamento e diagnóstico do profissional. Um exemplo disso é a Bateria Montreal de Avaliação da Comunicação [5], uma ferramenta utilizada na avaliação de habilidades comunicativas relacionada ao Hemisfério Cerebral Direito (HD). As tarefas que auxiliam na avaliação do paciente incluem: o questionário sobre anosognosia, que avalia a percepção dos indivíduos em relação aos seus distúrbios de linguagem e ao impacto que esses distúrbios exercem no dia a dia; o discurso dialógico, que analisa o comportamento verbal e não verbal do participante em uma situação de diálogo; a compreensão de metáforas, que avalia a capacidade de compreender vinte frases metafóricas; a evocação lexical, que analisa três tipos de habilidades — evocação livre, evocação com restrição ortográfica e evocação com restrição semântica; a prosódia linguística, que avalia a compreensão e a reprodução da prosódia linguística; a prosódia emocional, que avalia a capacidade de compreensão e a produção, tanto repetida quanto espontânea, da prosódia emocional; o discurso narrativo, que analisa a capacidade de recontar discursos narrativos, tanto de forma parcial quanto integral, e compreender seu conteúdo; os atos de fala indiretos, que avaliam a compreensão desses atos; e o julgamento semântico, que tem como foco a análise do julgamento semântico.

Outro tratamento é o Método Neuroacústica, o qual consiste em utilizar músicas e estímulos sonoros para incitar os dois hemisférios cerebrais. Com isso, promove a reabilitação de funções neurológicas e comunicativas em pacientes com lesões cerebrais. Porém, a ação dos estímulos atua de forma positiva, independente da colaboração ativa do paciente [6].

O desenvolvimento de soluções tecnológicas para a reabilitação neurológica tem avançado significativamente, com projetos voltados à terapia da fala e à estimulação cognitiva. Entre eles, destacam-se o *NeuronUP*, o *Talk Around It* e o *MentalPlus*. O *NeuronUP* é uma plataforma online para estimulação cognitiva, oferecendo exercícios personalizados para memória, atenção e linguagem, facilitando intervenções presenciais e remotas [7]. No entanto, sua aplicabilidade no Brasil é limitada por barreiras linguísticas e culturais, além da necessidade de configuração prévia. O *Talk Around It*, da Neuro Hero, auxilia na terapia da fala, sendo útil para pacientes com dificuldades de nomeação, como aqueles com afasia e demência, utilizando técnicas terapêuticas baseadas em dicas

hierarquizadas [8].

Apesar dos benefícios oferecidos por essas soluções, ainda existem desafios significativos, como a dificuldade de personalização das atividades, a ausência de suporte completo ao português e a falta de integração com o contexto terapêutico brasileiro. Essas limitações evidenciam a necessidade de ferramentas mais acessíveis, flexíveis e adaptadas à realidade local, garantindo maior efetividade no tratamento de pacientes [8].

Dessa forma, propõe-se o desenvolvimento de uma plataforma acessível, especialmente projetada para usuários com lesões neurológicas. Para facilitar a compreensão, recomenda-se um layout limpo e organizado, um fluxo de navegação previsível e textos curtos e diretos. Além disso, o uso de ícones e ilustrações pode reforçar as informações textuais, enquanto a interface deve evitar mudanças bruscas que possam desorientar o usuário. Para garantir uma experiência intuitiva, é essencial exibir mensagens claras de erro e sucesso, além de utilizar animações sutis para indicar a realização de ações, tornando a interação mais fluida e acessível para pacientes com dificuldades na fala e na memorização decorrentes de lesões neurológicas.

II. METODOLOGIA

Este projeto adotou uma abordagem prática no desenvolvimento de um aplicativo *web* funcional, estruturando a metodologia em etapas sequenciais e bem definidas. Inicialmente, foi realizado o levantamento de requisitos, incluindo um estudo e uma análise de como o site seria desenvolvido. Nessa fase, foram definidas a estrutura e as principais telas do sistema. Além disso, foram avaliadas diferentes abordagens para garantir uma navegação intuitiva e eficiente, considerando as necessidades específicas dos usuários.

Com base nas informações coletadas, foi realizada a criação de protótipos do aplicativo, garantindo uma interface intuitiva e acessível. O *design* foi centrado na usabilidade, adotando uma abordagem simplificada com ícones e botões de fácil identificação. Também foram consideradas diretrizes de acessibilidade para tornar a navegação mais eficiente para usuários com dificuldades cognitivas e motoras.

Na fase de desenvolvimento, o aplicativo foi implementado utilizando PHP como linguagem principal, em conjunto com HTML, CSS e JavaScript para a interface do usuário. O *back-end*, desenvolvido em PHP, foi responsável pelo gerenciamento de usuários, autenticação, armazenamento de dados e lógica de funcionamento do sistema. O *front-end* foi criado com HTML, CSS e JavaScript, proporcionando uma interface dinâmica e interativa. Já o banco de dados foi modelado em MySQL, contendo tabelas para usuários, *links* dos vídeos postados pela fonoaudióloga, *links* dos vídeos que o paciente deve assistir e comentários dos pacientes, permitindo um gerenciamento eficiente das informações e interações dentro da plataforma.

O aplicativo conta com 5 telas, sendo elas: a tela inicial, a tela de cadastro, a tela de *login*, a tela do paciente e a tela da fonoaudióloga.

- **Tela inicial:** A tela inicial apresenta as opções de *login* e criação de cadastro. Além disso, exibe a mensagem: "Neuro Web é um aplicativo web desenvolvido para

pacientes com lesão neurológica que afeta a fala e a memorização".

- **Tela de login:** A tela de login apresenta os campos para inserção de "E-mail" e "Senha".
- **Tela de cadastro:** A tela de cadastro contém os campos "Primeiro Nome", "Sobrenome", "E-mail", "Celular", "Senha" e "Confirmar Senha", além da opção de seleção de perfil, permitindo o cadastro como paciente ou profissional.
- **Tela do paciente:** A tela do paciente possui um menu lateral com as opções: "Vídeos", "Feedback" e "Sair".
- **Tela da fonoaudióloga:** A tela do profissional possui um menu lateral com as seguintes opções: "Armazenar Link", "Compartilhar Links Armazenados", "Pacientes", "Feedback dos Pacientes" e "Sair".

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Neuro Web é uma plataforma acessível e intuitiva, desenvolvida para proporcionar uma terapia dinâmica e interativa, permitindo a personalização das atividades de acordo com a evolução do paciente, um aspecto essencial na reabilitação, como aponta o estudo [9], que destaca a importância da personalização em terapias tecnológicas. Sua interface limpa e organizada, aliada a um fluxo de navegação previsível e textos diretos, facilita a compreensão e a interação, enquanto o uso de ícones e ilustrações complementa as informações textuais. Além disso, a ausência de mudanças bruscas evita desorientação, e as mensagens claras, combinadas a animações sutis, garantem uma experiência fluida e acessível, demonstrando o potencial da plataforma para auxiliar pacientes com dificuldades na fala e na memorização.

O aplicativo web foi estruturado de maneira intuitiva e, durante a implementação, o sistema foi testado internamente, garantindo que as funcionalidades essenciais, como a personalização de exercícios e o armazenamento de *feedbacks* no banco de dados, operassem corretamente. Embora o projeto tenha sido concebido para permitir que os usuários realizem exercícios de reabilitação fonoaudiológica de forma remota, acompanhados por profissionais da área, no momento ele ainda opera em ambiente local, sendo necessário um futuro processo de implantação em um servidor para viabilizar seu acesso online.

A interface do sistema foi projetada com foco na acessibilidade, garantindo que pacientes com diferentes níveis de familiaridade tecnológica possam utilizá-lo sem dificuldades. Segundo a Clínica Cerne [10], a integração de tecnologias, como aplicativos, é uma solução eficiente para superar barreiras de acesso em tratamentos neurológicos, promovendo maior alcance e continuidade.

Na tela inicial (Figura 1), ao clicar no botão "Criar Cadastro", o usuário é direcionado para a tela de cadastro, como pode ser visto na Figura 2. Já ao clicar no botão "Login", é redirecionado para a tela de *login*, como na Figura 3.



Fig. 1. Tela inicial do aplicativo web.

Na tela de cadastro (Figura 2), o usuário deve informar o primeiro nome, sobrenome, e-mail, celular, senha e confirmação de senha. Também é necessário selecionar o perfil, escolhendo entre paciente ou profissional. Após isso, o usuário é redirecionado para a tela de login, Figura 3. E não é possível cadastrar o mesmo e-mail mais de uma vez. Caso o e-mail informado já esteja cadastrado, um alerta será exibido com a mensagem "E-mail já cadastrado".

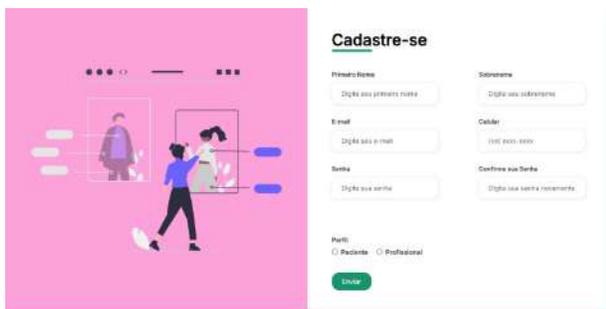


Fig. 2. Tela de cadastro do aplicativo web.

Na tela de login (Figura 3), o usuário deve inserir o e-mail e a senha cadastrados anteriormente. Caso o e-mail ou a senha estejam incorretos, um aviso é emitido, e será necessário tentar fazer login novamente.

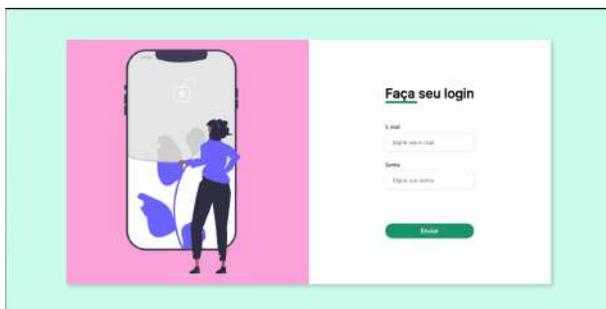


Fig. 3. Tela de login do aplicativo web.

Na tela do profissional (Figura 4), ao clicar no botão "Armazenar Link", uma nova tela é aberta, permitindo que o profissional armazene todos os vídeos disponibilizados para os pacientes. No botão "Compartilhar Links Armazenados", o profissional pode selecionar quais vídeos cada paciente deve

assistir. No botão "Pacientes", é exibida uma lista com todos os pacientes cadastrados. No botão "Feedback dos Pacientes", o profissional pode visualizar os feedbacks (em forma de texto) dos pacientes sobre os vídeos assistidos e os exercícios realizados. Por fim, ao clicar no botão "Sair", o profissional é redirecionado para a tela de login.



Fig. 4. Tela do profissional da área da fonoaudiologia

Na tela do paciente (Figura 5), ao clicar no botão "Vídeos", são apresentados os links de todos os vídeos que ele deve assistir. No botão "Feedback", o paciente pode digitar seu feedback para o fonoaudiólogo sobre os vídeos assistidos e os exercícios realizados. Por fim, ao clicar no botão "Sair", o paciente será redirecionado para a tela de login.



Fig. 5. Tela do paciente.

A integração com um banco de dados MySQL possibilita o armazenamento do cadastro dos usuários, como mostra a Figura 6; do feedback dos pacientes, Figura 9; dos vídeos, Figura 7; e do registro das atividades recomendadas para cada indivíduo, Figura 8. Dessa forma, os fonoaudiólogos podem acompanhar quais exercícios foram enviados e a resposta dos pacientes, permitindo ajustes personalizados no tratamento para maximizar a eficácia da terapia.

A seguir, são apresentadas as tabelas que compõem o banco de dados, destacando suas principais relações e funcionalidades. Essas tabelas armazenam informações essenciais para o funcionamento do sistema.

As imagens ilustram a estrutura do banco de dados, demonstrando como as informações são organizadas e interligadas para garantir a integridade e a eficiência do sistema.

Tabela dos usuários (Figura 6), onde armazena todos os pacientes e profissionais cadastrados.

id	nome	sobrenome	email	celular	senha	genero	confirme_senha	perfil
1	Sabrina	Silveira	srsilveira03@gmail.com	35999999999	122	feminino	122	paciente
2	Fono	Inatel	fono@gmail.com	35999999999	133	feminino	133	paciente
3	Marcela	Ribeiro	marcela@gmail.com	35999999999	144	feminino	144	paciente
4	Ivan	Dias	ivan.dias@gmail.com	35999999999	111	masculino	111	paciente

Fig. 6. Tabela dos usuários cadastrados.

Tabela *links* (Figura 7), onde armazena todos os vídeos postados pelo profissional.

idlink	link
17	https://www.youtube.com/watch?v=WP-WY2u0X...
18	http://localhost/fono/#/fono.php
19	https://chatgpt.com/k/65984ba1-5419-47c4-8d...

Fig. 7. Tabela de armazenamento dos *links* dos vídeos.

Tabela *links* pacientes (Figura 8), onde armazena todos os vídeos que um determinado paciente deve assistir.

id	id_paciente	id_link
16	1	17
17	1	18
18	1	19
19	1	17
20	1	18
22	1	19

Fig. 8. Tabela links dos pacientes

Tabela comentário paciente (Figura 9), onde armazena todos os *feedbacks* dos pacientes

id	id_paciente	id_link
16	1	17
17	1	18
18	1	19
19	1	17
20	1	18
22	1	19

Fig. 9. Tabela comentário dos paciente

O desenvolvimento do Neuro Web apresentou desafios significativos, especialmente na integração com o banco de dados, que exigiu uma estrutura robusta para armazenar e gerenciar um grande volume de informações de forma eficiente. Além disso, a implementação do *design* demandou um equilíbrio entre simplicidade e funcionalidade, garantindo uma interface intuitiva e acessível para pacientes com dificuldades cognitivas e de comunicação. Esses desafios foram fundamentais para a criação de um sistema que atende às necessidades dos usuários de maneira clara e eficiente.

Os resultados obtidos reforçam a importância de soluções tecnológicas acessíveis e adaptadas ao contexto da reabilitação neurológica. O Neuro Web demonstrou potencial para auxiliar na terapia da fala e na estimulação cognitiva, oferecendo uma ferramenta eficaz para pacientes e profissionais. Contudo, para que seu impacto seja ampliado, a implementação em um servidor e a realização de testes com usuários reais serão etapas fundamentais. Dessa forma, o projeto poderá evoluir para um ambiente de produção, contribuindo de forma significativa para a reabilitação e qualidade de vida dos pacientes.

IV. CONCLUSÃO

O projeto concentrou-se em solucionar desafios enfrentados por pacientes com dificuldades na fala e na memorização, por meio do desenvolvimento de uma plataforma digital. A proposta visou não apenas a criação de um sistema funcional, mas também a integração de recursos que favorecessem a usabilidade e acessibilidade, garantindo um impacto positivo na reabilitação dos usuários.

O acompanhamento por parte dos profissionais de saúde é outro aspecto essencial do Neuro Web. A plataforma salva *feedbacks* sobre o progresso dos pacientes, permitindo que os fonoaudiólogos avaliem o desenvolvimento e ajustem as atividades conforme necessário, um processo que melhora os resultados terapêuticos e reforça a eficácia do tratamento.

Combinando tecnologia e cuidado humano, o Neuro Web se apresenta como uma ferramenta valiosa para o tratamento de condições neurológicas, reforçando a importância de soluções digitais no cenário da reabilitação.

O desenvolvimento deste aplicativo web proporcionou uma solução inovadora e acessível para pacientes com dificuldades na fala e na memorização, promovendo maior independência e qualidade de vida. A metodologia aplicada garantiu que o

sistema fosse construído com base em pesquisa, usabilidade e acessibilidade, tornando a navegação intuitiva para os usuários.

A implementação de tecnologias como PHP, MySQL, HTML, CSS e JavaScript possibilitou a criação de uma plataforma robusta e dinâmica. Além disso, o envolvimento de profissionais da área da saúde contribuiu significativamente para validar as funcionalidades e garantir a adequação do sistema às necessidades dos pacientes.

Atualmente, o sistema está em funcionamento em ambiente local, com todos os seus módulos integrados e operacionais. Embora ainda não tenha sido implantado em um servidor para acesso remoto, os testes realizados indicam que a aplicação está estruturada para futura expansão. A implementação em um ambiente de nuvem será um próximo passo essencial para ampliar o alcance da ferramenta, permitindo que pacientes e profissionais de saúde utilizem o sistema de forma remota e contínua.

Dessa forma, este projeto demonstra a importância da tecnologia no auxílio à reabilitação de pacientes, destacando o impacto positivo que soluções digitais podem ter na vida das pessoas com necessidades especiais.

V. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) por fornecer a infraestrutura e o suporte necessários para a realização deste projeto, proporcionando um ambiente propício para a nossa pesquisa e aprendizado. De mesma forma agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

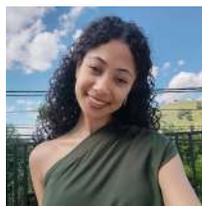
- [1] Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). *Afasia: condição neurológica*. 2024. URL: <https://sp.unifesp.br/epm/noticias/afasia-condicao-neurolologica>.
- [2] Nicolas Fraga Pinheiro Thales Pavão Cardoso Beatriz Vasconcelos Ribeiro Marcela Amaral Tanus Ian Christian Souza de Novaes Raquel Aguiar Meira Maria Letícia das Neves Hansen Gabrielle Siqueira de Medeiros Hyanca Larissa França Ferreira Nathalia Abreu Ribeiro. “Neuroplasticidade e Recuperação Funcional: Novas Abordagens no Tratamento de Lesões Neurológicas”. Em: *Revista REASE 10* (2024), p. 9. URL: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/download/13017/6227/25330>.
- [3] NeuronUP. *Reabilitação fonoaudiológica para pessoas com afasia*. 2024. URL: https://neuronup.com.br/noticias-de-estimulacao-cognitiva/transtorno-de-linguagem/reabilitacao-fonoaudiologica-para-pessoas-com-afasia/?utm_source=chatgpt.com.
- [4] NeuronUP. *Reabilitação neuropsicológica no comprometimento cognitivo leve*. 2024. URL: https://neuronup.com.br/reabilitacao-cognitiva/reabilitacao-neuropsicologica-no-comprometimento-cognitivo-leve/?utm_source=chatgpt.com.

- [5] Rochele Paz Fonseca. *Adaptação da Bateria Montreal de Avaliação da Comunicação: Habilidades Linguísticas de Ativação do Hemisfério Direito Durante o Envelhecimento*. 2005. URL: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000479907&loc=2005&l=ccab4ad0a3a44be0>.
- [6] Marcelo Peçanha de Paula Isabela Albeny Gallo. *Neuroacústica Aplicada no Tratamento de uma Paciente com Sequela de AVC Isquêmico*. Ano de Publicação. URL: http://www.neuroacustica.com/artigos/Artigo_Disartria_V3R1.2.pdf.
- [7] NeuronUP. *NeuronUP - Plataforma de Estimulação Cognitiva*. 2024. URL: <https://neuronup.com/>.
- [8] NeuroHero. *NeuroHero - Reabilitação Cognitiva*. 2024. URL: <https://www.neurohero.com/>.
- [9] FMU - Faculdades Metropolitanas Unidas. *Fisioterapia - Tratamento de Lesões Neurológicas*. 2024. URL: <https://arquivo.fmu.br/prodisc/fisioterapia/jss.pdf>.
- [10] Clínica Cerne. *3 Tecnologias que Auxiliam na Neuroreabilitação*. Acesso em: 05 fev. 2025. 2024. URL: <https://www.clinicacerne.com.br/post/3-tecnologias-que-auxiliam-na-neurorea>.

AUTORES

Marcela de Cássia Ribeiro

graduanda em Engenharia de Software pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Possui formação técnica em Eletrônica, com ênfase em Automação, pela Escola Técnica de Eletrônica “Francisco Moreira da Costa”(ETE FMC).Atualmente, é bolsista de



Iniciação Científica no eHealth Innovation Center.

Sabrina Ramos Silveira

graduanda em Engenharia de Software pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Possui formação técnica em Eletrônica, com ênfase em Automação, pela Escola Técnica de Eletrônica “Francisco Moreira da Costa”(ETE FMC). Atualmente, é bolsista de Iniciação Científica no eHealth Innovation Center.





Me. Prof. Filipe B. Vilela engenheiro Biomédico graduado pelo Inatel, com graduação sanduíche pela Milwaukee School of Engineering (MSOE) e Illinois Institute of Technology (IIT). Professor do Inatel. Professor orientador do centro de pesquisas em Engenharia Biomédica eHealth Innovation Center - Inatel. Pesquisador na área de biomateriais pela Unifei. Pesquisador visitante na Empa/ETH Domain, Saint Gallen. Engenheiro-voluntário no Hospital Antônio Moreira da Costa. Pesquisador visitante da Universidad de Concepción.



Rita Elizabeth Santos de Almeida Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, técnica em equipamentos médicos pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco Moreira da Costa. Especialista em sistemas no Inatel, atuando como coordenadora de projetos no eHealth Innovation Center.



Elisa Rennó de Carneiro Dester Fisioterapeuta formada pela Universidade Gama Filho (RJ) em 1999; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela Universidade Castelo Branco (RJ) em 2003; Professora do curso de pós-graduação em Engenharia Clínica e Biomédica do Inatel; Professora do curso de Engenharia Biomédica do Inatel.

Desenvolvimento de tecnologia sem fio para monitoramento de temperatura em incubadoras neonatais

Daví P. Rabelo, Elisa R. C. Dester, Júlia de F. Carvalho, Luma R. B. do Prado, Pedro Paulo de P. Junqueira
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

davi.padula@gec.inatel.br, elisa.renno@inatel.br, julia.carvalho@gec.inatel.br, luma.prado@inatel.br, pedro.junqueira@gec.inatel.br

Abstract—This project shows the development of a remote sensing method for temperature monitoring in Neonatal incubators, with the aim of reducing the need for manual monitoring present in hospitals. The method relies on the use of radio frequency sensors and an incubator monitoring application.

Index Terms—Neonatal, Newborn, RFID, Tags

Resumo—Este projeto mostra o desenvolvimento de um método de sensoriamento a distância para monitoramento de temperatura em incubadoras Neonatais, com o objetivo de reduzir a necessidade do monitoramento manual presentes nos hospitais. O método se infere no uso de sensores de radio frequência e um aplicativo de monitoramento da incubadora.

Palavras chave—Neonatal, Recém-nascido, RFID, Tags

I. INTRODUÇÃO

A manutenção da temperatura corporal de recém-nascidos em incubadoras neonatais representa um dos desafios mais críticos nas UTIs (Unidade de Tratamento Intensivo) neonatais. Segundo um estudo, o cuidado com a manutenção da temperatura corporal do recém-nascido é essencial para sua sobrevivência e constitui um desafio constante para os profissionais que o assistem [1]. A hipotermia, em particular, está associada a diversas complicações graves, incluindo morbidade por infecção, coagulação anormal, acidose pós-parto, adaptação tardia da circulação fetal para neonatal e síndrome do desconforto respiratório [2]. Além dessas complicações, a queda na temperatura corporal está diretamente relacionada a taxas mais altas de mortalidade, sendo estimado que para cada 1°C de redução na temperatura corporal do recém-nascido, há um aumento de 28% na mortalidade neonatal [3]. De acordo com estudos realizados no Nordeste do Brasil, em 2008 e 2009, aproximadamente 31% dos recém-nascidos apresentavam hipotermia, ocorrendo casos de hipotermia moderada a grave [4]. Esses dados reforçam a importância de estratégias eficazes para o monitoramento térmico e controle adequado nas unidades neonatais, para a melhoria nos cuidados para com o Recém-Nascido.

Considerando a importância do monitoramento contínuo da temperatura corporal dos recém-nascidos, muitas das incubadoras apresentam falhas, onde se incluem o constante desprendimento e descalibração dos sensores de temperatura empregados nas incubadoras, necessitando de manutenção contínua [5], sua fragilidade estrutural que leva à quebra recorrente e gera a perda de contato direto com a pele do recém-nascido. Tais limitações evidenciam a necessidade de soluções mais eficientes e seguras para o monitoramento térmico em ambientes neonatais.

Diante dessas problemáticas e do relato identificado na Santa Casa de Belo Horizonte, no qual foi observado recorrentes falhas nos sensores de temperatura por contato presentes nas incubadoras neonatais, foi proposto o desenvolvimento de um sensor compacto, leve e de alta eficiência, minimizando o desconforto e o estresse do neonato, assegurando maior fixação e garantindo um monitoramento mais eficaz, essencial para a avaliação médica do estado de saúde dos pacientes.

II. METODOLOGIA

A. Pesquisa de sensores

Foi realizado pesquisas bibliográficas referentes a custo-benefício e funcionamento, sendo levantadas as seguintes opções: Sensores de Fibra Óptica, Termografia por Infravermelho, Sensores Vestíveis e Sensores de Identificação por Rádio-Frequência (RFID/*Radio Frequency Identification*). Após análises sobre as pesquisas, foi percebido que os sensores de Fibra Óptica e os de infravermelho se adequavam ao propósito do projeto, porém possuíam um custo elevado, já os sensores vestíveis não eram práticos para o público em questão. Desse modo os sensores RFID foram os que mais se encaixaram nas expectativas, devido a sua funcionalidade aliada a um baixo custo.

Sensores de RFID possibilitam o rastreamento de objetos, identificação e o registro de dados por meio de ondas de radiofrequência, normalmente composto por quatro principais elementos: o leitor, a antena, a *tag* para captação de informações a distância e uma unidade de controle. Sendo a antena a responsável por enviar e receber as informações da *tag* e envia-las para o leitor, que por sua vez transmite as informações para a unidade de controle.

Após a escolha do sensor RFID, foi discutido primeiramente a segurança do neonato, para isso foi verificado os limites de exposição humana em uma faixa de frequência de 100kHz até 10GHz, como pode ser visto na Figura 1 [6]

Características de exposição	Faixa de Radiofrequências	SAR média do corpo inteiro (W/kg)	SAR localizada (cabeça e tronco) (W/kg)	SAR localizada (membros) (W/kg)
Exposição Ocupacional	100 kHz a 10 MHz	0,4	10	20
	30 MHz a 10 GHz	0,4	10	20
Exposição da população em geral	100 kHz a 10 MHz	0,08	2	4
	30 MHz a 10 GHz	0,08	2	4

Fig. 1. Tabela feita pela ANATEL referente ao SAR.

Após as análises dos valores de absorção referentes ao SAR (*Specific absorption rate*), embora com poucas fontes referentes aos neonatais, foi percebido que a energia de absorção ocasionada pelas *tags* está dentro dos limites aceito.

B. Aprofundamento sobre o sensor RFID

Para a realização dos testes iniciais foi utilizada a antena ST *Near-Field* (13,56MHz) e o leitor ST25RU3993, pertencentes ao ICC (*Inatel Competence Center*). Inicialmente, foi testado a distância de alcance da antena para a obtenção de resposta das *tags*.

Foi identificado que a distância para leitura é de no máximo 17 cm, embora a distância não seja muito grande, foi possível manipular e analisar algumas informações com a memória da *tag*. Posteriormente foi adquirido a *tag* FM13DT160 UHF(*Ultra-High-Frequency*), que possui um sensor de temperatura acoplado.

b.1) Testes em Arduino

Com o arduino IDE foi desenvolvido um *software* para a comunicação entre o sensor RFID RC255 e a *tag* FM12DT160.

A *tag* possui um sensor de temperatura acoplado, que realiza a leitura dos valores de temperatura e os envia no formato hexadecimal.

b.2) Testes em aplicativos

Foram realizados testes nos aplicativos *DT 160 TLogger* e *NFC Tools*, afim de, identificar o funcionamento da *tag* FM13DT160 UHF na captação dos valores de temperatura em tempo real. O aplicativo *DT 160 TLogger* é um aplicativo dedicado para a medição de temperatura por RFID, enquanto o aplicativo *NFC Tools* é responsável por enviar os comandos protocolados de acordo a *tag*.

b.3) Teste com Software da ST

Foram realizados testes com o *software* da ST, por onde foi possível configurar a *tag* e enviar os comandos corretamente.

Utilizando o *Software Development Kit* para o ST25RU3993, foi possível alterar o código-fonte da *tag*.

C. Aplicativo

Foi criado um aplicativo, desenvolvido no *Android Studio*, que inclui as informações de conexão, a medição da temperatura das incubadoras em tempo real, histórico de medições e possui capacidade de conectar mais incubadoras da UTI neonatal.

A versão de teste do aplicativo foi desenvolvida para possibilitar a verificação da temperatura das incubadoras e o histórico de temperatura do RN.

D. Incubadora + RFID

O sistema de monitoramento via RFID foi acoplado em uma incubadora pertencente ao laboratório eHealth Innovation Center, para a realização de testes, a antena foi posicionada de maneira que possibilitasse a conexão. Dessa forma, para o monitoramento foi utilizado o microcontrolador ESP32 devido ao seu suporte a *Bluetooth*, juntamente com o aplicativo desenvolvido.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a escolha dos sensores, foram considerados os seguintes aspectos: custo-benefício e funcionalidade. Os sensores de fibra óptica, os de infravermelho e os sensores vestíveis apresentavam funcionalidades avançadas, no entanto, o custo se revelou elevado. Assim, determinou-se que a tecnologia RFID seria a melhor opção, oferecendo um equilíbrio entre custo-benefício e eficiência no sensoriamento.

Posteriormente foi verificado se o sistema ofereceria segurança para os pacientes neonatais. Observou-se que as pesquisas relacionadas a neonatos eram escassas, com poucos artigos disponíveis. A partir dos estudos analisados, comparou-se a dissipação de energia da *tag*, concluindo-se que, com base em condições verificadas em adultos, esse fator não representaria um problema. No entanto, faz-se necessário um aprofundamento para a confirmação da segurança em RN.

Durante a idealização do projeto do sensoriamento, teve como o primeiro esboço uma antena capaz de captar mais de uma *tag* simultaneamente, tal antena teria a frequência de 800-900MHz(*Ultra-High-Frequency*), que poderia alcançar uma distância de até 18 metros em média, o esboço do ambiente pode ser visto na Figura 2).

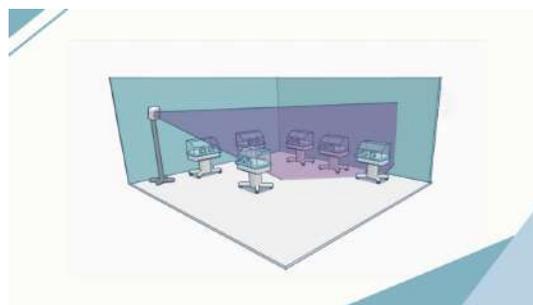


Fig. 2. Idealização do projeto.

Porém, com a limitação de uma antena de 13.6MHz(*Near-Field*), foi identificado durante os testes que a distância de leitura era de 17cm, como pode ser visualizado na Figura 3).



Fig. 3. Antena NF da ST e a distancia.

Os primeiros testes foram realizados com a antena e o leitor da ST pertencente ao ICC, como pode ser visto na Figura 4).



Fig. 4. Antena ST NF para testes.

Inicialmente os testes tinham como propósito verificar o funcionamento da leitura e manipulação de memória das tags, que podem ser visualizadas na Figura 5



Fig. 5. Primeiras tags para testes.

Com esses componentes, foi possível obter resultados sobre o funcionamento da antena e sua comunicação com a tag, observando-se a detecção da presença da tag na Figura 6 e a troca de dados na Figura 7



Fig. 6. Interface do software da ST utilizado.



Fig. 7. Interface da janela de leitura de tags.

Após os testes iniciais no software da ST, optou-se por dar

continuidade ao projeto utilizando o Arduino Uno e a antena RFID RC522, visando a participação na Feira Tecnológica do Inatel (FETIN). Para esse evento, foi incorporada a tag FM13DT160, que possui como funcionalidade a medição de temperatura.

Inicialmente as tags foram submetidas a alguns testes de funcionamento. Para isso, foram utilizados dois aplicativos de celular: o DT160 TLogger, recomendado pela própria fabricante da tag, e o NFC Tools. Com esses testes, verificou-se que as tags estavam retornando valores conforme o protocolo estabelecido, como pode ser visto na Figura 8.



Fig. 8. Teste feito pelo aplicativo NFC Tools.

Após a confirmação do funcionamento, iniciaram-se os testes com o Arduino. O código desenvolvido tinha como objetivo verificar a detecção da tag e, em seguida, enviar uma série de comandos em formato hexadecimal, como visto na Figura 9 aguardando o retorno de respostas também em hexadecimal, como visto na Figura 10, correspondentes ao valor da temperatura. Isso foi viabilizado pelo uso da biblioteca do RC522, que possui a função PCD-TransceiveData, responsável por enviar informações para a tag.



Fig. 9. Comando para enviar informações a tag

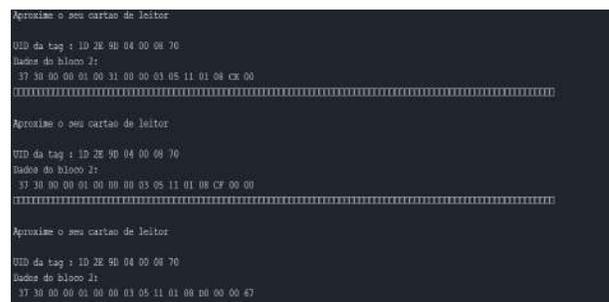


Fig. 10. Resultado dos comando no arduino

Foi desenvolvido um aplicativo *mobile* para um melhor monitoramento. O objetivo desse aplicativo visou facilitar o acompanhamento das incubadoras em uso, além de oferecer um histórico das medições de temperatura do neonato, como pode ser visto na Figura 11.



Fig. 11. Imagens das interfaces do protótipo do aplicativo.

Para a apresentação do projeto na FETIN, foi realizada uma montagem do sistema em uma incubadora neonatal do laboratório eHealth Innovation Center, a fim de, simular como o projeto seria instalado em um ambiente hospitalar. Para isso, a antena foi posicionada perto da cúpula da incubadora e foi utilizado um manequim para demonstrar a localização da *tag* no neonato, a fixação seria com o auxílio de micropore, como pode ser visto na Figura 12.



Fig. 12. Montagem do modelo da incubadora junto ao aplicativo.

Durante os testes finais no arduino foi percebido que os resultados não eram o esperado, sempre retornando valores aleatórios em sua maioria. Um dos motivos foi encontrado na comunicação, já que a antena RC522 não suportava completamente o modelo da *tag*. Para contornar, foi decidido voltar os testes ao *software* da ST, onde havia mais precisão nos envios de comandos.

Com o *software* da ST, foi possível verificar os comandos relacionados à *tag*, conforme descrito em seu *datasheet* fornecido pelo fabricante. Embora tenha sido possível estabelecer comunicação com a *tag*, o *software* apresentou a limitação de envio de apenas um comando por vez, o que dificultou a comunicação com a *tag*. Durante os testes realizados, as respostas recebidas estavam em conformidade com o esperado no

datasheet, mas as leituras de temperatura não foram adequadas para o desenvolvimento. Assim, foram realizadas alterações nas configurações das *tags*, mas as respostas não apresentaram mudanças.

Como última tentativa, houve a realização de alterações no código fonte do próprio *software*, com o uso do *STM32CubeIDE*, porém, com o fato de haver um nível de complexidade elevado, não foi possível obter resultados satisfatórios, necessitando de maiores pesquisas para a evolução do projeto.

IV. CONCLUSÃO

Considerando a importância do monitoramento de temperatura em UTIs neonatais, foi desenvolvido um projeto para realizar o sensoriamento à distância de neonatos em incubadoras.

Foram montados protótipos utilizando Arduino e o *software* ST25RU001, juntamente com as *tags* de sensoriamento de temperatura. O projeto apresentou algumas limitações tecnológicas referentes ao uso da antena e das *tags*, onde não foi possível receber todos os dados referentes ao monitoramento da temperatura, mas foi possível montar um protótipo com sensor RFID e integrá-lo a uma incubadora, demonstrando seu funcionamento.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se a necessidade de mais estudos, a fim de aprofundar o conhecimento sobre o sensor RFID e melhorar a comunicação entre o sensoriamento da *tag* e a antena.

Em discussões para próximos passos, foi estipulado implementar ao aplicativo o sensoriamento por leitores NFC presentes em celulares e utilizar uma antena UHF para melhores resultados.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) pelo apoio oferecido ao projeto. Agradecemos também à Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (FINATEL) pelo suporte financeiro e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Gabriela Neves dos Santos Silva Amorim. “Termorregulação do recém-nascido nas primeiras horas de vida em unidade neonatal. Trabalho de Conclusão de Curso”. Em: *Universidade Federal de Alagoas, Escola de Enfermagem, Maceió* (2019).
- [2] Wagner Bento de MAGALHÃES. “Monitoramento da temperatura de recém-nascidos: desenvolvimento de um dispositivo sem fio e prova de conceito”. Em: *Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Medicina, Programa de Pós-Graduação em Saúde da Mulher, Belo Horizonte* (2020).
- [3] FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. *Controle térmico do recém-nascido pré-termo*. Portal de Boas Práticas em Saúde da Mulher, da Criança e do Adolescente. URL: <https://portaldeboaspraticas.iff.fiocruz.br/atencao-recem-nascido/controle-termico-do-recem-nascido-pre-termo/>. (acesso em 07/01/2025).

- [4] Aldiânia Carlos BALBINO. “Termorregulação do recém-nascido:cuidados na admissão em unidade de emergência pediátrica. Revista da Rede de Enfermagem do Nordeste”. Em: *Revista da Rede de Enfermagem do Nordeste* 14.2 (2013). URL: <https://www.redalyc.org/pdf/3240/324027986010.pdf>.
- [5] Natanael Jefete da Silva Remoardo; Ralf Dworak. “MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA INCUBADORA NEONATAL PREVENTIVE MAINTENANCE IN THE NEONATAL INCUBATOR.” Em: *Graduando em Tecnologia em Sistemas Biomédicos na FATEC-Bauru* (2018). URL: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/10777/1/sistemasbiomedicos_2017_2_natanaelremoardo_manutencaopreventivaemincubadoraneonatal.pdf.
- [6] ANATEL(Agência Nacional de Telecomunicações). *Limites de exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos*. URL: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO7PtW2t42GJUeX84hrDv9LwFA64_VRDbwihH-XodssOoyDub7TtisJLmZL8-cawzi7YBFgYwK0f-IpfI3IeQ3r (acesso em 01/07/2019).



quisas em Engenharia Biomédica eHealth Innovation Center.

Luma Rissatti Borges do Prado Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, mestranda em Engenharia Biomédica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Professora no curso de Engenharia Biomédica do Inatel e professora do curso técnico em equipamentos biomédicos da ETE “FMC”.

Elisa Rennó de Carneiro Dester Fisioterapeuta formada pela Universidade Gama Filho (RJ) em 1999; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela Universidade Castelo Branco (RJ) em 2003; Professora do curso de pós-graduação em Engenharia Clínica e Biomédica do Inatel; Professora do curso de Engenharia Biomédica do Inatel.



AUTORES



Daví Padula Rabelo Graduando em Engenharia da Computação no Instituto Nacional de Telecomunicações - (INATEL). Possui experiência em desenvolvimentos de software. Atualmente atua como bolsista de iniciação científica no projeto “Neo Tech”, focado em soluções tecnológicas para monitoramento em UTIs.



Júlia de Freitas Graduanda em Engenharia de Computação pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Possui experiência em sistemas embarcados, desenvolvimento de software e eletrônica. Atua como bolsista de iniciação científica no projeto “Neo Tech”, focado em soluções tecnológicas para monitoramento em UTIs neonatais.



Pedro Paulo de Paiva Junqueira Graduando em Engenharia de Computação pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Possui experiência em desenvolvimento de software, web e aplicativos mobile. Atua como voluntário de iniciação científica no projeto “NeoTech”, focado em soluções precisas e confiáveis para monitoramento de UTIs neonatais.

Desenho e Desenvolvimento de um Protótipo de Sistema de Vácuo por Venturi para uma Central de Gases Medicinais Hospitalares

Brian Arauco Paniagua, Rodrigo Martinez Severich, Eynar Calle Viles, Maria Rene Ledezma Flores

Universidad Privada del Valle - UNIVALLE

apb2019606@est.univalle.edu, rmartinezs@univalle.edu, ecallevi@univalle.edu, mledezmaf@univalle.edu

<https://orcid.org/0009-0008-4917-1149>

<https://orcid.org/0009-0003-5588-7753>

<https://orcid.org/0000-0003-1477-2813>

Abstract—This study presents the design and development of a vacuum system based on the Venturi effect for hospital medical gas centers. The developed system employs a 3/4" (20 mm) Venturi Mazzei injector with an 8.8 mm throat, driven by a Truper BQAP-1/2-250 pump with a maximum capacity of 45 L/min to generate the required flow rate. System monitoring is carried out using MPX2200GP sensors for pressure, FS300A for flow, and a level sensor, all managed by an ESP32 microcontroller. The acquired data is transmitted in real time via the MQTT protocol to a remote server with a dedicated web interface for monitoring and control. The results indicate that this system represents a viable and cost-effective alternative to conventional methods, providing an efficient solution with lower operational and maintenance costs.

Index Terms—Flow, Pressure, Medical Vacuum, Venturi.

Resumo—Este estudo apresenta o desenho e desenvolvimento de um sistema de vácuo baseado no efeito Venturi para centrais de gases medicinais hospitalares. O sistema desenvolvido emprega um injetor Venturi Mazzei de 3/4" (20 mm) com uma garganta de 8,8 mm, impulsionado por uma bomba Truper BQAP-1/2-250 com capacidade máxima de 45 L/min para gerar o fluxo necessário. A supervisão do sistema é realizada por meio de sensores MPX2200GP para pressão, FS300A para fluxo e um sensor de nível, gerenciados por um microcontrolador ESP32. Os dados adquiridos são transmitidos em tempo real por meio do protocolo MQTT para um servidor remoto com uma interface web dedicada para monitoramento e controle. Os resultados obtidos indicam que este sistema representa uma alternativa viável e econômica aos métodos convencionais, oferecendo uma solução eficiente com menores custos operacionais e de manutenção.

Palavras chave—Fluxo, Pressão, Vácuo Medicinal, Venturi.

I. INTRODUÇÃO

O vácuo medicinal desempenha um papel fundamental em diversos procedimentos clínicos, incluindo intervenções cirúrgicas, terapia respiratória e sucção de fluidos. As soluções tradicionais, como as bombas de vácuo de anel líquido, implicam altos custos de aquisição, consumo energético e manutenção contínua. Este trabalho apresenta uma proposta baseada no efeito Venturi, proporcionando um método inovador, econômico e eficiente para gerar vácuo medicinal em hospitais. O vácuo medicinal é essencial na infraestrutura sanitária moderna, especialmente em hospitais, sendo utilizado em diversas aplicações clínicas como cirurgia, terapia respiratória e processos de aspiração de fluidos. Nesses

contextos, as soluções convencionais, como bombas elétricas ou sistemas de anel líquido, representam desafios importantes devido aos seus altos custos operacionais, considerável consumo energético e necessidade constante de manutenção preventiva e corretiva [1].

Em resposta a essas limitações técnicas e econômicas, este estudo se concentra em uma alternativa baseada no efeito Venturi. O efeito Venturi utiliza princípios fundamentais da dinâmica dos fluidos para gerar vácuo por meio da diminuição da pressão do fluido ao aumentar sua velocidade em uma seção mais estreita do tubo. Essa técnica permite uma redução significativa nos custos de manutenção e operação devido à ausência de partes móveis e ao menor desgaste do sistema [2].

Além disso, a integração de sensores avançados para monitoramento remoto em tempo real proporciona melhorias substanciais na supervisão do sistema, aumentando a eficiência e permitindo uma manutenção preditiva mais eficaz. Essa abordagem não apenas reduz os custos, mas também melhora a segurança e confiabilidade do sistema global, garantindo assim um desempenho constante e seguro em aplicações médicas sensíveis.

II. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O sistema proposto utiliza o princípio do efeito Venturi, descrito pela equação de Bernoulli. Essa equação estabelece que, em um fluxo incompressível, a soma da pressão estática, pressão dinâmica e pressão potencial permanece constante ao longo de qualquer linha de corrente [3]:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (1)$$

Donde:

- P é a pressão do fluido.
- ρ é a densidade do fluido.
- v é a velocidade do fluido.
- g é a aceleração da gravidade.
- h é a altura do fluido em relação a um ponto de referência.

À medida que o fluido passa por uma seção estreita, sua velocidade aumenta, resultando em uma redução da pressão e geração de vácuo.

De acordo com [4], a equação pode ser expressa como:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2)$$

Pelo princípio da equação da continuidade [5], a conservação da massa pode ser matematicamente representada por:

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad (3)$$

Essas equações permitem analisar o comportamento do fluido no sistema Venturi, estabelecendo a relação entre pressão, velocidade e vazão em cada seção do conduto. Aplicando o princípio da continuidade (3) à equação de Bernoulli (2), obtém-se:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (4)$$

III. DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE

O hardware do sistema foi desenvolvido sobre uma placa de circuito impresso (PCB), projetada utilizando o software Proteus (Figura 1 y 2). A seleção dos componentes eletrônicos foi realizada com o objetivo de garantir, em conjunto, a eficiência e a precisão do sistema.

A. Circuito de Potência e Controle

O circuito de potência mostrado na Figura 1 fornece tensões específicas e estáveis, necessárias para o funcionamento adequado dos sensores e atuadores do protótipo. Este circuito é composto pelos seguintes elementos:

- Transformador de 220V AC para 12V AC.
- Regulador de tensão L7805, responsável pela alimentação do microcontrolador ESP32.
- Reguladores de tensão L7808 e L7908, utilizados para a alimentação do amplificador de instrumentação AD620 e do amplificador operacional AO741.
- Regulador de tensão L7810, destinado à alimentação do sensor de pressão MPX2200GP.

A placa de controle, ilustrada na figura 2, inclui uma conexão com um relé de estado sólido SSR-25, utilizado para controlar a ativação e desativação segura da bomba de água e das eletroválvulas. Para amplificação do sinal proveniente do sensor de pressão MPX2200GP, foram utilizados amplificadores operacionais AD620 e UA741. Além disso, o sistema processa as leituras dos flutuadores do sensor de nível e do sensor de fluxo, sendo todos gerenciados pelo ESP32.

O sensor de pressão MPX2200GP monitora a pressão negativa gerada, enquanto um vacuômetro conectado ao sistema exibe os valores em quilopascals diretamente no painel de controle. O sensor de fluxo FS300A, com capacidade para medir até 60 L/min, opera dentro da faixa ideal para monitorar o fluxo de água através do Venturi. O sensor de nível

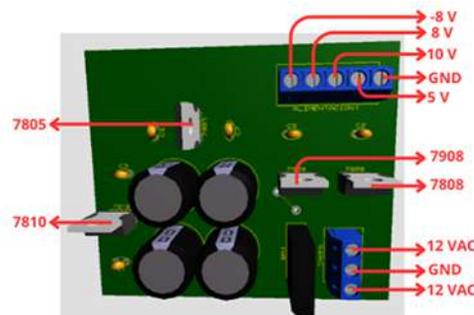


Fig. 1. Projeto da placa de Fonte

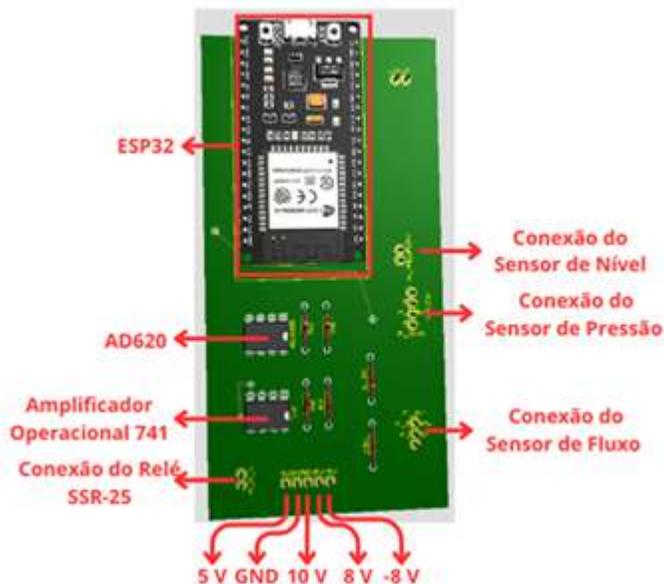


Fig. 2. Projeto da placa de Controle

supervisiona constantemente a quantidade de água disponível no reservatório.

O procedimento do sistema inicia no reservatório de água, que tem uma capacidade de até 8 litros. O volume de água é regulado pelo sensor de nível, garantindo um fluxo adequado. A água é impulsionada através de um adaptador de 3/4", conectado à entrada da bomba periférica, e direcionada ao sensor de fluxo FS300A antes de ingressar no injetor Venturi por sua boquilha de entrada.

Ao passar pela seção convergente do Venturi, o fluido experimenta um aumento de velocidade e uma redução de pressão, gerando um efeito de sucção na boquilha central. Esse fenômeno cria o vácuo no recipiente de pressão, permitindo sua utilização no sistema. A pressão gerada é regulada por eletroválvulas, que permanecem fechadas ao serem desenergizadas, garantindo a conservação do vácuo. Por fim, a água retorna ao reservatório, completando o ciclo operacional.

O microcontrolador ESP32 é responsável pela leitura e processamento dos sensores, bem como pelo acionamento das eletroválvulas e da bomba periférica. Além disso, devido à sua conectividade Wi-Fi integrada, ele transmite os dados em tempo real para uma plataforma web dedicada.

B. Projeto 3D

Utilizando o software Fusion 360, foi projetada uma estrutura robusta para acomodar o circuito de controle e um painel frontal que garante o posicionamento adequado dos componentes, como vacuômetro, interruptores, indicadores visuais e acesso seguro ao controle eletrônico interno do equipamento (figura 3).

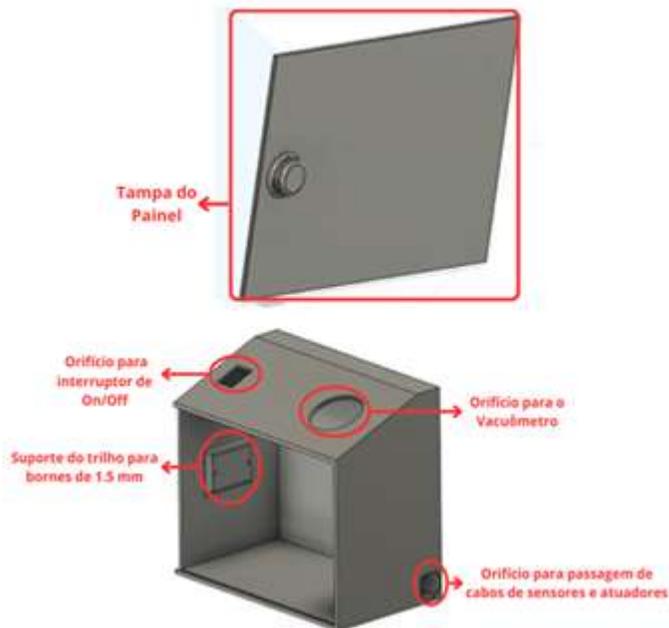


Fig. 3. Projeto do Painel de Controle

C. Integração e Montagem

Conforme mostrado na figura 4, o sistema integra um painel de controle com as placas de potência e controle. Foram incorporadas borneiras de 1,5 mm para uma distribuição ordenada da alimentação elétrica ao transformador de voltagem, bomba de água e relé de estado sólido SSR-25. O ESP32 controla a ativação das eletroválvulas (220 VAC) e da bomba de água. A ativação e desativação do sistema são realizadas por meio de um interruptor principal.

Todos os componentes foram integrados em uma base de melamina resistente, equipada com rodas para facilitar o transporte e manuseio do sistema (figura 5). A disposição otimizada dos componentes, incluindo o reservatório de água, bomba, recipiente de pressão e painel de controle, resultou em um protótipo funcional, robusto e eficiente, pronto para testes em condições reais de operação.

IV. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

A plataforma web desenvolvida emprega tecnologias como PHP, HTML, JavaScript e MySQL para a gestão e visualização dos dados obtidos pelo sistema. Sua interface gráfica foi projetada para permitir o monitoramento em tempo real dos parâmetros medidos, além do controle remoto dos atuadores, incluindo a bomba e as eletroválvulas. Adicionalmente, o banco de dados armazena continuamente as leituras dos sensores, facilitando a análise de tendências históricas e a manutenção preditiva do sistema.

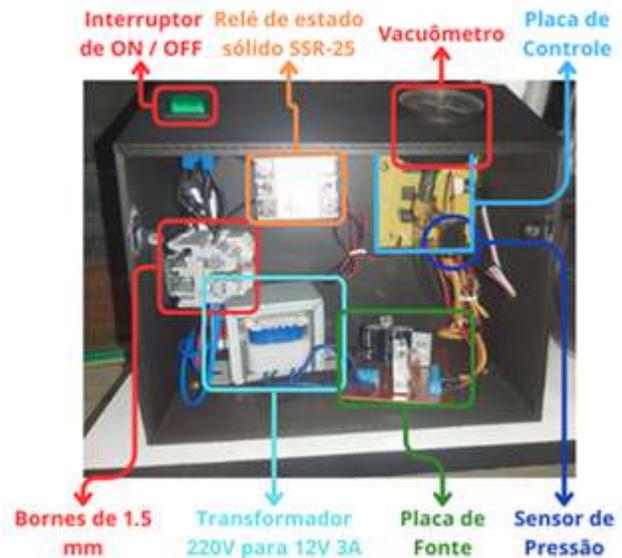


Fig. 4. Montagem do Painel de Controle

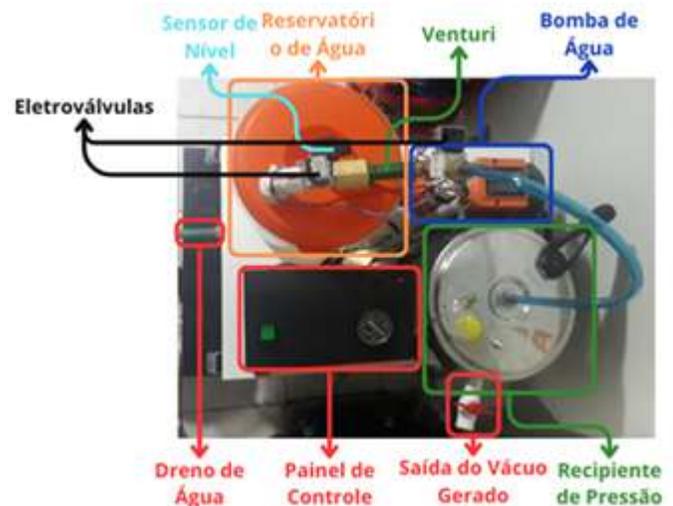


Fig. 5. Partes da montagem final do Painel de Controle

O desenvolvimento do software foi focado em garantir uma supervisão eficiente e em tempo real da operação do sistema de vácuo. Para isso, foi implementado um microcontrolador ESP32, selecionado por suas capacidades avançadas de conectividade sem fio e processamento simultâneo de múltiplos sinais. A comunicação dos dados é realizada por meio do protocolo MQTT, permitindo a transmissão eficiente das informações para um servidor em nuvem hospedado na AWS. O fluxo operacional do ESP32 segue a seguinte sequência (Figura 6)

- **Conexão à rede Wi-Fi:** Estabelece a comunicação com a infraestrutura de rede.
- **Estabelecimento da conexão com o servidor MQTT:** O ESP32 se inscreve nos tópicos correspondentes para receber comandos e enviar dados do sistema.
- **Verificação de comandos:** Supervisiona a existência de ordens para ativação ou desativação da bomba.
- **Aquisição de dados:** Registra as leituras dos sensores de pressão (MPX2200GP), fluxo (FS300A) e nível de água.

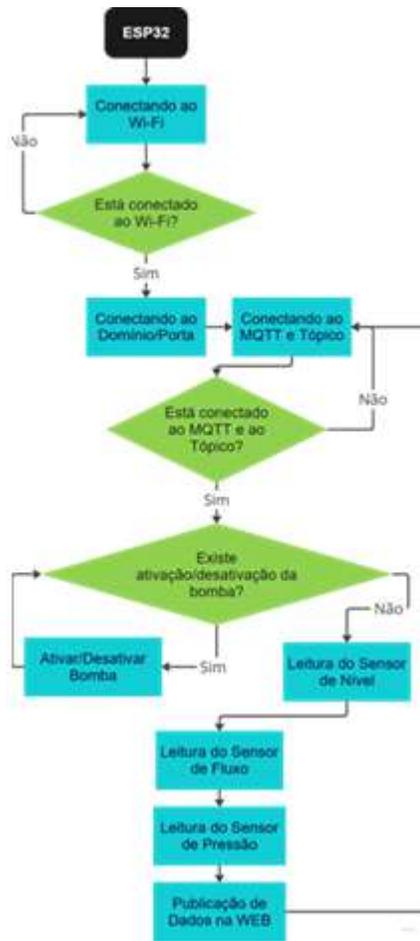


Fig. 6. Diagrama de fluxo do ESP32

- **Transmissão de dados:** Os valores capturados são enviados em tempo real para o servidor web via MQTT.
- **Monitoramento e controle iterativo:** A conexão com o servidor e o status da bomba são continuamente verificados, repetindo o ciclo até atingir o nível de vácuo necessário.

Esse esquema de controle garante uma resposta rápida às variações do sistema, aumentando a eficiência operacional e facilitando a supervisão remota por meio da plataforma web.

V. CÁLCULO DO FLUXO E VÁCUO GERADO

Para realizar os cálculos do sistema, foi aplicada a equação de Bernoulli (4). A vazão máxima da bomba Truper BQAP-1/2-250 é de 45 L/min (0.00075 m³/s). De acordo com [6], há uma tabela equivalente para a densidade da água. Habitualmente, em Cochabamba, a temperatura varia entre 29 e 33 °C, com uma pressão atmosférica de 74140 Pa, portanto, foi adotado um valor médio de 1000 kg/m³.

Os dados iniciais utilizados nos cálculos foram os seguintes:

- Diâmetro interno de entrada: 20 mm
- Diâmetro interno da garganta: 8.8 mm
- Vazão da bomba Truper: 45 L/min = 0.00075 m³/s
- Densidade da água: 1000 kg/m³
- Pressão atmosférica em Cochabamba: 74140 Pa

A área transversal da entrada do Venturi é determinada por:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (5)$$

$$A_{\text{entrada}} = \pi * \left(\frac{20 \text{ mm}}{2} \right)^2 = 314.16 \text{ mm}^2$$

Convertendo de mm² para m²:

$$314.16 \text{ mm}^2 = 3.1416 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

A área da garganta do Venturi é:

$$A_{\text{garganta}} = \pi * \left(\frac{8.8 \text{ mm}}{2} \right)^2 = 60.82 \text{ mm}^2$$

Convertendo de mm² para m²:

$$60.82 \text{ mm}^2 = 6.082 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Com esses valores, as velocidades são determinadas por:

$$V_{\text{entrada}} = \frac{Q}{A_{\text{entrada}}} \quad (6)$$

$$V_{\text{entrada}} = \frac{0.00075 \text{ m}^3/\text{s}}{3.1416 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 2.387 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{garganta}} = \frac{0.00075 \text{ m}^3/\text{s}}{6.082 \times 10^{-5} \text{ m}^2} \approx 12.331 \text{ m/s}$$

Utilizando a equação de Bernoulli (4) e considerando a densidade da água ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) e pressão atmosférica ($P_{\text{atm}} = 74140 \text{ Pa}$), obtém-se a pressão na garganta:

$$P_{\text{garganta}} = P_{\text{entrada}} + \frac{1}{2} \rho (V_{\text{entrada}}^2 - V_{\text{garganta}}^2) \quad (7)$$

Substituindo os valores:

$$\begin{aligned} P_{\text{garganta}} &= 74140 \text{ Pa} + \frac{1}{2} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times ((2.387 \text{ m/s})^2 - (12.331 \text{ m/s})^2) \\ &= 962.104 \text{ Pa} \end{aligned}$$

O vácuo gerado em kPa é aproximadamente:

$$Vácuo_{\text{gerado}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{garganta}} \quad (8)$$

$$Vácuo_{\text{gerado}} = 74140 \text{ Pa} - 962.104 \text{ Pa} = 73177.896 \text{ Pa}$$

O que equivale aproximadamente a:

$$73177.896 \text{ Pa} \approx 73.177 \text{ kPa}$$

Esse valor teórico demonstra um potencial significativo do Venturi para gerar vácuo de maneira eficiente.

VI. RESULTADOS

O protótipo implementado conseguiu gerar um vácuo real medido de aproximadamente 33 kPa. Esse resultado deve-se a restrições práticas do sistema, como perdas de carga e limitações na bomba utilizada. Apesar dessas limitações, o sistema atendeu às expectativas funcionais e aos parâmetros clínicos requeridos, fornecendo dados em tempo real por meio de uma interface web acessível tanto para usuários técnicos quanto não técnicos.

Os resultados obtidos do protótipo são representados graficamente na figura 7, demonstrando claramente o comportamento do sistema a 33 kPa. Na plataforma web, são exibidas figuras representativas das leituras dos sensores de fluxo e pressão, permitindo analisar o desempenho do sistema durante os testes experimentais e compará-lo com os cálculos teóricos.



Fig. 7. Gráfico da leitura do sensor de Pressão MPX2200GP

VII. CONCLUSÃO

O sistema proposto demonstrou ser uma alternativa eficiente e econômica em comparação com os métodos convencionais de geração de vácuo medicinal. A implementação do monitoramento remoto por meio de sensores e transmissão via MQTT facilitou significativamente a gestão e supervisão do sistema. Recomenda-se que estudos futuros se concentrem em otimizar o design do Venturi para maximizar o nível de vácuo atingido e validar o sistema em ambientes clínicos reais.

O sistema desenvolvido representa uma alternativa efetiva, econômica e viável em relação aos sistemas convencionais. No entanto, existem considerações técnicas relevantes que justificam por que o sistema não atinge os 73 kPa teóricos calculados, alcançando apenas cerca de 33 kPa. Essas limitações práticas incluem perdas por fricção nas tubulações, turbulências internas, redução real da vazão da bomba em relação às suas especificações nominais, pequenos vazamentos no reservatório utilizado (panela de pressão) e diferenças entre os diâmetros reais e nominais do Venturi. Essas considerações são fundamentais para futuras melhorias do protótipo.

REFERÊNCIAS

- [1] Ohio Medical. “Los principios del vacío y la aplicación clínica en el entorno del hospital”. Em: *Hospitecnia* (2023). URL: <https://hospitecnia.com/documentacion/vacio-aplicacion-clinica-entorno-hospital/> (acesso em 27/08/2023).
- [2] Vacuum. *COVAL - Generación del vacío - Venturi - bomba de vacío - generador de vacío VR, CIL, GVP, LEM, LEMAX, GVMAX*. 2023. URL: <https://www.coval-iberica.com/la-tecnologia-de-vacio/guia-de-la-manipulacion-por-vacio/generacion-de-vacio/> (acesso em 28/08/2023).
- [3] O. Planas. “Ecuación y principio de Bernouilli: aplicaciones y ejemplos”. Em: (2025). URL: <https://energia-nuclear.net/fisica/mecanica-de-fluidos/ecuacion-de-bernouilli> (acesso em 13/03/2025).
- [4] I. B. Noguera. “¿Qué es la ecuación de Bernoulli?” Em: *Ingeniería Química Reviews* (2025). URL: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/ecuacion-de-bernoulli.html> (acesso em 14/03/2025).
- [5] F. Zapata. “Ecuación de continuidad: fórmula, aplicaciones, ejercicios resueltos”. Em: *Lifeder* (2025). URL: <https://www.lifeder.com/ecuacion-de-continuidad/> (acesso em 14/03/2025).
- [6] E. H. J. Bardales. “Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C, 1 atm”. Em: (2025). URL: https://www.academia.edu/11323057/Densidad_del_agua_1%C3%ADquida_entre_0_C_y_100_C_1atm (acesso em 14/03/2025).

AUTORES

Brian Arauco Paniagua Estudante de Engenharia Biomédica da Universidade Privada do Vale - UNIVALLE, membro ativo do Centro de Pesquisa Transdisciplinar para a Promoção do Desenvolvimento da Inovação Sustentável e Digital (CIT-INOVAÇÃO), secretário-geral da IEEE Young Professional Seção Bolívia e membro ativo da Sociedade Científica de Estudantes de Engenharia Biomédica da UNIVALLE (SCEIB).



Rodrigo Martínez Severich Docente de Engenharia Biomédica da Universidade Privada do Vale - UNIVALLE (2020), Gerente proprietário da empresa SEVERICH (2017), MBA na Escola Europeia de Negócios EEN (2016), IMEX na Escola Europeia de Negócios EEN (2016), Abdominal Ultrasound BachelorClass Course na Universidade Médica de Viena (2017), membro fundador do Colégio de Engenharia Biomédica SIB Cochabamba (2024) e CTO da WIVER, software especializado para gestão e visualização de imagens médicas (2024).





Eynar Calle Viles é mestre em Telecomunicações, com especialização em Redes de Comunicações e Telemática, e possui uma pós-graduação em IoT pelo Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, Brasil. Com mais de 8 anos de experiência, é especialista em projeto de redes, FTTH, IoT e sistemas embarcados. Desenvolveu inovações tecnológicas, incluindo propostas de patentes, como o "Robô Móvel

para Detecção de Metais" e o "Sistema de Localização para o Satélite Túpac Katari". Além disso, possui várias publicações e participações em revistas e congressos internacionais. Suas principais áreas de interesse incluem antenas e propagação, segurança da informação e IoT, contribuindo ativamente para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras. Atualmente, atua como coordenador de pesquisa na Faculdade de Informática e Eletrônica da Univalle e é o presidente da IEEE Computer Society Bolívia.



Maria Rene Ledezma Flores Engenheira Biomédico pela Univalle - Universidad del Valle (2018), Mestrado em Engenharia Elétrica com ênfase em Biomecânica pela Udelar - Universidad de la República (2023). Atualmente, é professora em tempo integral de Engenharia Biomédica, trabalhando principalmente em projetos de pesquisa em biomecânica e

ergonomia.

Protótipo de Sistema de Monitoramento Remoto de Sinais Vitais com Arduino UNO e ESP32

Rojas Flores Mateo Sebastián, Torrico Arancibia Sara Edith

Universidad Privada del Valle – UNIVALLE

mateo02rojas09@ieec.org, sara27torrico753@gmail.com

Abstract—Remote monitoring systems have improved management in various industries, including healthcare. These systems have optimized medical care, reducing costs and improving patients' quality of life. This paper presents a prototype for remote vital signs monitoring (heart rate and temperature) using Arduino Uno and ESP32. The combination of low cost, flexibility, and ease of programming makes Arduino an accessible and customizable option. The system uses specific sensors and employs the ESP32 for Bluetooth communication. The results demonstrate its effectiveness in measuring and transmitting vital signs in real-time. This project stands out for its simplicity and scalability.

Index Terms—Arduino, Telemedicine, Vital Signs

Resumo—Os sistemas de monitoramento remoto aprimoraram a gestão em diversas indústrias, incluindo a saúde. Esses sistemas otimizaram a atenção médica, reduzindo custos e melhorando a qualidade de vida dos pacientes. Este artigo apresenta um protótipo de monitoramento remoto de sinais vitais (frequência cardíaca e temperatura) utilizando Arduino Uno e ESP32. A combinação de baixo custo, flexibilidade e facilidade de programação do Arduino o torna uma opção acessível e personalizável. O sistema emprega sensores específicos e utiliza o ESP32 para comunicação via Bluetooth. Os resultados demonstram sua eficácia na medição e transmissão de sinais vitais em tempo real. Este projeto se destaca por sua simplicidade e escalabilidade.

Palavras chave—Arduino, Telemedicina, Sinais Vitais

I. INTRODUÇÃO

O corpo humano desempenha diversas funções essenciais a todo momento, e o estudo dessas funções é denominado fisiologia. Entre essas funções, algumas se destacam tanto pela facilidade relativa de serem medidas quanto pelo alto valor informativo que transmitem por meio de sinais biológicos ou biopotenciais. Entre elas estão a frequência cardíaca, a temperatura corporal, a frequência respiratória e a saturação de oxigênio no sangue (SpO₂).

O monitoramento de sinais vitais engloba a medição, observação e análise de determinados sinais biológicos que refletem o estado atual do organismo. Esse processo permite avaliar a função cardiovascular, respiratória e metabólica de um indivíduo em tempo real, facilitando a tomada de decisões médicas oportunas. Geralmente, é realizado continuamente por meio de equipamentos médicos estacionários em áreas de internação ou salas cirúrgicas, auxiliando na detecção de anomalias como insuficiência respiratória, parada cardíaca ou hipotermia.

Para capturar esses sinais vitais, são utilizados sensores, dispositivos eletrônicos que permitem converter um sinal biológico em um sinal elétrico manipulável por meio de tecnologia física (hardware) e tecnologia virtual (software).

Existem sensores comerciais capazes de medir mais de um sinal biológico, conhecidos como sensores multiparâmetro, cuja implementação em sistemas de monitoramento de sinais vitais permite a miniaturização do sistema, reduz sua complexidade e minimiza o ruído gerado pela adição de um maior número de componentes ao circuito eletrônico.

No desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, a placa de desenvolvimento Arduino UNO, que utiliza o microcontrolador ATmega328P, destaca-se por sua versatilidade, facilidade de manipulação e capacidade de integrar diversos sensores de maneira simples. É amplamente utilizada no desenvolvimento de protótipos de circuitos e sistemas eletrônicos em áreas como Eletrônica, Telecomunicações e Engenharia Biomédica.

A telemedicina é uma área da Engenharia Biomédica que abrange o uso de tecnologias da informação e comunicação (TIC) para fornecer serviços médicos a distância. Isso inclui consultas, diagnósticos, monitoramento e tratamento de pacientes sem a necessidade de uma interação física entre o médico e o paciente. Essa tecnologia permite a transmissão de dados de sinais vitais em tempo real, facilitando o monitoramento remoto de pacientes com doenças crônicas, o acompanhamento pós-operatório e a assistência médica em áreas rurais ou de difícil acesso.

A família de chips ESP32 é considerada um componente essencial em TIC, IoT (Internet das Coisas) e transmissão de dados, sendo capaz de realizar conexões Bluetooth e Wi-Fi. Além disso, destaca-se pelo seu baixo consumo de energia, o que é especialmente útil quando utilizado exclusivamente como transmissor de informações.

Os sinais gerados ou adquiridos em um circuito eletrônico podem ser transmitidos diretamente para um computador de mesa (PC) ou laptop por meio de cabos (USB, SPI, etc.) ou de forma sem fio. O computador permite a visualização desses sinais, o armazenamento de informações em bancos de dados e a análise avançada por meio de softwares desenvolvidos para essa finalidade.

Neste artigo, é apresentado o desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto de sinais vitais, utilizando o Arduino UNO como processador de informações e o ESP32 como transmissor de dados para um computador, permitindo a visualização das medições e o armazenamento das informações.

II. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão bibliográfica abordando os conceitos de monitoramento de sinais vitais e transmissão remota de dados. Foram utilizadas as plataformas Google Acadêmico, IEEE Xplore, PubMed e Scielo, com combinações de palavras-chave como: monitoramento de sinais vitais,

transmissão remota de dados, telemedicina, IoT na saúde, sensores biomédicos, monitoramento remoto e plataformas de saúde conectada. Foram determinados os materiais a serem utilizados:

- Arduino UNO com ATmega328P
- ESP32-WROOM32
- LM35 Sensor de Temperatura
- LED infravermelho
- Fotodiodo
- LM358 Amplificador Operacional
- Laptop

Para a programação do Arduino UNO e do ESP32, utilizou-se a plataforma Arduino IDE com a linguagem de programação C++. O design do circuito foi inicialmente baseado em um circuito proposto na literatura [1], ao qual foram adicionados elementos adicionais para expandir e personalizar seu funcionamento. Para o sensor de batimentos cardíacos com o LM358, foram revisadas diversas fontes para configurá-lo corretamente em um modo de operação adequado [2, 3, 4].

O sistema de medição dos batimentos cardíacos utiliza sensores ópticos para detectar mudanças no volume sanguíneo na ponta dos dedos a cada batimento. O diodo infravermelho (IR) emite luz infravermelha para a ponta do dedo, e o fotodiodo detecta a porção da luz refletida de volta. A intensidade da luz refletida depende do volume de sangue dentro do dedo, fazendo com que cada batimento cardíaco altere ligeiramente a quantidade de luz infravermelha detectada pelo fotodiodo. Assim, os pulsos podem ser quantificados amplificando esse sinal com o LM358, um amplificador operacional de alta ganho, e posteriormente filtrando-o com componentes resistivos e capacitivos.

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do sistema de detecção de batimentos cardíacos. O design do sistema é composto por vários componentes, incluindo uma unidade de sensores com um LED infravermelho (IR LED) e um fotodiodo, uma unidade de amplificação, uma unidade de microcontrolador, uma unidade de transmissão de dados, uma unidade de visualização e uma unidade de alimentação de energia. O diagrama de blocos do sistema de detecção de batimentos cardíacos é apresentado a seguir:

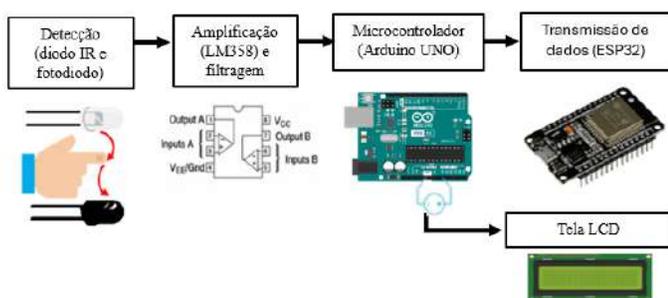


Figura 1. Diagrama de blocos para o sistema de detecção de batimentos cardíacos

O sistema de medição da temperatura utiliza o sensor LM35, um sensor analógico de precisão que converte a temperatura em um sinal de tensão linearmente proporcional. Esse sensor

tem uma precisão de $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ em temperatura ambiente, baixa impedância de saída e não requer calibração adicional, tornando-o a opção mais adequada para esta aplicação.

O sensor de temperatura está diretamente conectado ao microcontrolador, que realiza a conversão analógico-digital correspondente e, posteriormente, envia os dados ao módulo de transmissão. A Figura 2 mostra o diagrama de blocos do sistema de monitoramento de temperatura.

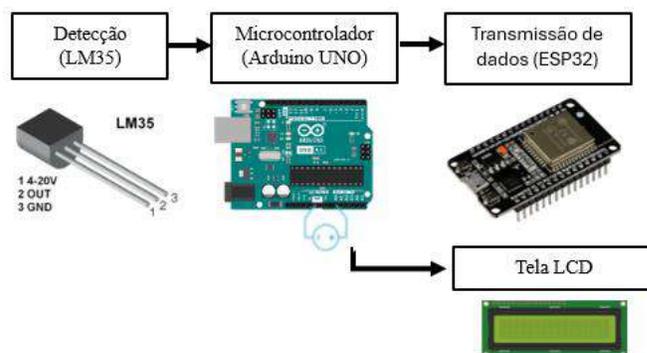


Figura 2. Diagrama de blocos para o sistema de detecção de temperatura

O dispositivo (um computador ou um celular) então recebe os dados enviados pelo ESP32 para que possam ser visualizados remotamente. A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos da transmissão inalâmbica de informações desde o ESP32 até o celular que tem uma aplicação de uso livre para visualizar a terminal Bluetooth.



Figura 3. Diagrama de blocos para o sistema de transmissão sem fio

Ressalta-se que ambos os sensores compartilharão o mesmo sistema de transmissão e exibição de dados, ou seja, serão utilizados um único Arduino UNO e um único ESP32.

O funcionamento do sistema foi testado em duas etapas:

A. Teste dos Sensores

Para verificar o funcionamento dos sensores, seguiram-se os seguintes passos:

No caso do sensor de temperatura, o LM35 foi configurado no circuito adequado, e seu valor foi observado em uma tela LCD. Em seguida, o valor foi comparado com a temperatura ambiente real, obtida por meio de um aplicativo móvel. Os valores medidos foram muito próximos, confirmando o correto funcionamento do sensor LM35.

Para o sensor de batimentos cardíacos, utilizou-se como referência a faixa normal de batimentos por minuto em repouso (60-100 bpm). O sensor foi testado posicionando o dedo entre os LEDs, e os valores obtidos estavam dentro da faixa esperada, validando o correto funcionamento do sistema de medição. [5]

B. Teste de Transmissão de Dados

O teste de transmissão de dados consistiu na verificação dos dados enviados serialmente pelo ESP32 para um dispositivo móvel. Se os valores transmitidos correspondessem aos

exibidos no LCD antes da transmissão, significaria que o ESP32 estava enviando corretamente os dados. Essa verificação foi confirmada durante os testes.

III. RESULTADOS

Na Figura 4, apresenta-se o circuito montado e funcionando corretamente. Houve contratempos em relação ao sensor de frequência cardíaca, que foram resolvidos ao realizar uma mudança nos componentes passivos (resistores e capacitores). Na parte de temperatura, não houve grandes complicações, pois, por ser um integrado, sua conexão é mais direta e não requer mais do que polarizar o sensor e enviar seu sinal de saída para a entrada analógica do Arduino, neste caso, o pino A0.

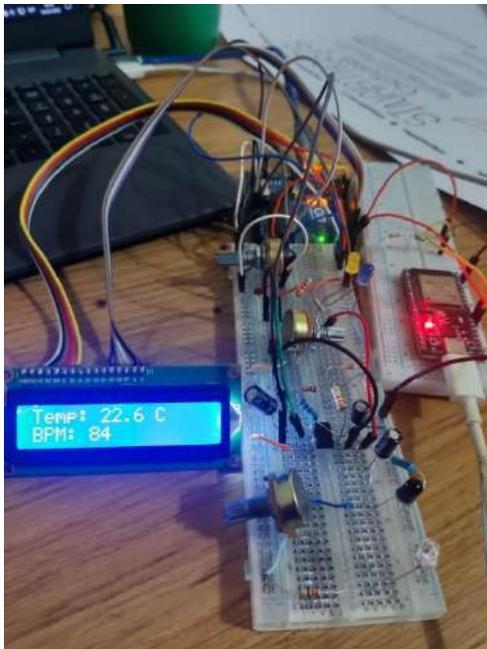


Figura 4. Circuito armado

Em relação à transmissão de dados, o ESP32 funcionou como transmissor de informações por Bluetooth. Essas informações foram recebidas em um telefone celular com o Serial Bluetooth Monitor. A Figura 5 mostra uma captura de tela das informações recebidas com sucesso no celular para visualização básica.

```
22:51:42.278 Connecting to ESP32_BT ...  
22:51:42.826 Connected  
22:51:46.979 Temperatura: 23.24 C, Valor Latido: 0, Conteo Latido: 2, BPM: 84
```

Figura 5. Informações recebidas no celular

Validou-se que as informações obtidas pelo Arduino por meio dos sensores eram enviadas de forma íntegra ao celular. Conexão bem-sucedida.

IV. RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para pesquisas futuras, um sistema de monitoramento adicional poderia ser incluído para detectar anormalidades em qualquer parâmetro, alertando o indivíduo imediatamente por meio de um alarme sonoro integrado. Parâmetros adicionais, como pressão arterial, também podem ser adicionados para tornar o dispositivo mais abrangente. Além disso, os estágios deste protótipo podem ser aprimorados, como melhores configurações de amplificação e filtros de nível mais

alto para melhor condicionamento do sinal, tornando o sistema mais sensível às mudanças fisiológicas. Você também pode optar por um sistema de comunicação sem fio diferente (por exemplo, usar WiFi no ESP32 em vez de Bluetooth para um alcance de comunicação maior, ou usar sistemas de transmissão e recepção de radiofrequência), o que permite um alcance de distância de comunicação maior.

V. CONCLUSÃO

O protótipo proposto do sistema de monitoramento de sinais vitais usando Arduino Uno e ESP32 provou ser uma solução eficaz para medir e transmitir parâmetros fisiológicos em tempo real. A medição da temperatura foi realizada com o sensor LM35 e a medição da frequência cardíaca com um LED IR, um fotodiodo e um amplificador operacional. Os dados de ambos os sensores foram posteriormente processados pelo Arduino Uno e enviados remotamente para um computador ou celular com o ESP32, que permite a comunicação sem fio via WiFi e Bluetooth, usando a opção Bluetooth neste caso, que se mostrou mais rápida. Os dados finalmente podem ser visualizados em tempo real no dispositivo móvel remotamente.

Os resultados obtidos confirmam que o sistema é capaz de registrar batimentos cardíacos e temperatura corporal de forma eficiente e precisa (dentro de uma pequena margem de erro), enviando esses dados sem fio via Bluetooth. O uso da tecnologia sem fio através do ESP32 dá maior mobilidade ao sensor e abre a possibilidade de enviar dados tanto para um computador quanto para um celular remotamente, para melhor visualização em tempo real.

A partir disso, concluímos que tecnologias de baixo custo e código aberto têm grande potencial em telemedicina e monitoramento remoto, facilitando o monitoramento contínuo de pacientes sem a necessidade de equipe médica no local. Isso pode ser especialmente útil para pessoas em áreas rurais, onde o atendimento médico nem sempre é acessível. Devido à sua portabilidade, custo e facilidade de uso, o sistema proposto é tecnicamente relevante por combinar sensores biomédicos de baixo custo com conectividade sem fio, permitindo a implementação em regiões com recursos limitados. Sua arquitetura modular facilita adaptações para incluir mais parâmetros vitais, promovendo o avanço de soluções portáteis e acessíveis na telemedicina.

REFERÊNCIAS

- [1] Parihar, V. R., Tonge, A. Y., & Ganorkar, P. D. (2017). Heartbeat and temperature monitoring system for remote patients using Arduino. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(5), 55-58.
- [2] Jubadi, W. M., & Sahak, S. F. A. M. (2009, October). Heartbeat monitoring alert via SMS. In *2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications* (Vol. 1, pp. 1-5). IEEE.
- [3] Dogo, E. M., Sado, F., & Adah, S. M. (2013). Design of a simple and low-cost microcontroller based medicare device for heart beat monitoring. *African Journal of Computing & ICT*, 6(5).
- [4] Babiker, S. F., Abdel-Khair, L. E., & Elbasheer, S. M. (2011). Microcontroller based heart rate monitor using fingertip sensors. *University of Khartoum Engineering Journal*, 1(2), 47-51.
- [5] Kranjec, J., Beguš, S., Geršak, G., & Drnovšek, J. (2014). Non-contact heart rate and heart rate variability measurements: A review. *Biomedical Signal Processing and Control*, 13, 102-112.

AUTORES



Mateo Sebastián Rojas Flores

Graduando no 5º período de Engenharia Biomédica no Universidad Privada del Valle (UNIVALLE). Vice-presidente da seção estudantil da IEEE. Secretário de Pesquisa da Sociedade Científica de Engenharia Biomédica. Interessado em instrumentação médica.



Sara Edith Torrico Arancibia

Graduanda no 5º período de Engenharia Biomédica no Universidad Privada del Valle (UNIVALLE). Desenvolvedora Web e administradora da seção estudantil da IEEE. Interessada no desenvolvimento de robótica.

Jogo sério para pré habilitação cirúrgica e reabilitação muscular em idosos

Eduardo Pereira Valias, Elisa Rennó Carneiro Dester, Rita Elizabeth Santos de Almeida
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

eduardo.valias@gec.inatel.br, elisa.renno@inatel.br, r.elizabeth@inatel.br

Abstract – This project presents a serious game for pre-surgical habilitation and muscle rehabilitation in elderly patients. The method used is based on capturing muscle movements through electromyography (EMG) sensors. The objective is to improve elderly patients' adherence to traditional therapeutic treatments through a playful and interactive approach.

Index terms – Serious games, Pre-surgical habilitation, Muscle rehabilitation, Electromyography (EMG), Elderly engagement, Assistive technology, Motor rehabilitation

Resumo – Neste projeto é apresentado um jogo sério para pré-habilitação cirúrgica e reabilitação muscular de idosos. O método utilizado baseia-se na captação de movimentos musculares por meio de sensores de eletromiografia (EMG). O objetivo é melhorar a adesão dos pacientes idosos aos tratamentos terapêuticos tradicionais através de uma abordagem lúdica e interativa.

Palavras chave – Jogos sérios, Pré-habilitação cirúrgica, Reabilitação muscular, Eletromiografia (EMG), Engajamento de idosos, Tecnologia assistiva, Reabilitação motora

I. INTRODUÇÃO

A falta de adesão aos tratamentos terapêuticos é um desafio crítico enfrentado por profissionais da saúde, especialmente em contextos de pré-habilitação cirúrgica e reabilitação muscular para idosos. Esse problema impacta diretamente a eficácia dos tratamentos, aumentando o risco de complicações pós-operatórias e comprometendo a qualidade de vida desses pacientes [1].

Estudos recentes mostram que 30% dos pacientes submetidos a cirurgias abdominais de grande porte apresentam complicações pós-operatórias, muitas vezes relacionadas a uma recuperação insuficiente e a uma preparação inadequada no período pré-cirúrgico. Em pacientes idosos, que frequentemente apresentam comorbidades e maior fragilidade física, esses índices podem ser ainda mais preocupantes [1].

Embora os jogos sérios apresentem potencial significativo na área da saúde, sua implementação em contextos clínicos ainda enfrenta desafios. Aplicações de jogos sérios em pacientes pós-acidente vascular cerebral (AVC) destaca a necessidade de integrar essas tecnologias com protocolos de saúde bem definidos, garantindo que sejam tão eficazes

quanto os métodos convencionais [2]. Além disso, quando aplicados à reabilitação de idosos, essas ferramentas têm sido exploradas como complementos em contextos terapêuticos, especialmente para promover o engajamento e facilitar a adesão ao tratamento [3]. No entanto, a implementação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios, como a necessidade de maior validação científica e de estudos comparativos que demonstrem sua eficácia em relação aos métodos convencionais [3].

Entre as iniciativas existentes, destaca-se o jogo *I Blue It*, um jogo sério desenvolvido para reabilitação respiratória. Ele utiliza a respiração como controle do personagem Blue, cujo objetivo é alcançar alvos e desviar de obstáculos para concluir as fases. O jogo exemplifica como a gamificação pode ser utilizada para incentivar a adesão ao tratamento fisioterapêutico, tornando a recuperação mais acessível e motivadora para os pacientes [4].

Os jogos sérios têm o potencial de criar um ambiente lúdico e motivador, mas sua aplicação prática exige ajustes para atender às limitações físicas e cognitivas dos idosos, garantindo que os benefícios terapêuticos sejam alcançados de forma consistente e segura. Por isso, há um consenso na literatura de que o desenvolvimento dessas ferramentas deve ser acompanhado de estudos que comprovem sua viabilidade e efetividade clínica [3].

Uma grande barreira para os jogos sérios voltados para idosos é a pouca familiaridade com tecnologias digitais, o que pode levá-los a sentir insegurança e resistência ao utilizá-los na reabilitação. A percepção de complexidade e o receio de cometer erros podem desmotivar o uso dessas ferramentas. Para contornar esse desafio, é fundamental desenvolver interfaces intuitivas e oferecer suporte adequado, garantindo uma experiência acessível e confortável para esse público [5].

Assim estabelecido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um jogo sério controlado por eletromiografia (EMG), a fim de promover maior adesão aos programas de pré-habilitação cirúrgica e reabilitação muscular.

II. METODOLOGIA

A. Sensor EMG

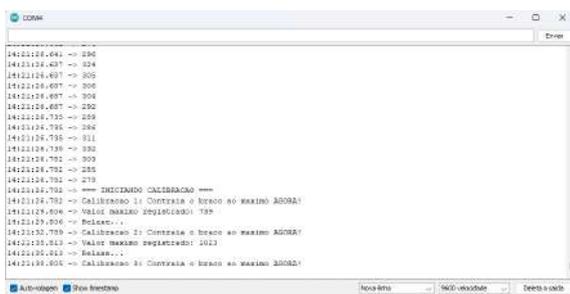
O EMG é a representação gráfica da ativação elétrica dos músculos associadas às diferentes ações musculares; nela é possível observar o comportamento do músculo em ações musculares isométricas, concêntricas e excêntricas. Neste

caso, a inervação muscular transmite os potenciais de ação que podem ser mensurados por eletrodos colocados sob a superfície da pele [6].

O projeto *MyoJump* surgiu com o intuito de explorar a utilização dos eletrodos de eletromiografia (EMG) como controle para jogos sérios voltados à reabilitação física de idosos. Esses eletrodos foram escolhidos por possibilitarem a utilização de uma força personalizada de acordo com as capacidades individuais dos usuários idosos. Para a implementação prática, foram utilizados eletrodos posicionados especificamente no ventre de cabeça longa do bíceps e na região anterior ao cotovelo como referência anatômica. Esses eletrodos foram conectados ao módulo de EMG AD8232, responsável pela captação dos sinais elétricos musculares.

O módulo de EMG AD8232 foi escolhido devido a diversas vantagens que o tornaram uma opção viável para esta aplicação. Entre seus principais benefícios, destacaram-se o baixo custo em comparação com sensores de EMG dedicados, como o *MyoWare*, permitindo uma implementação mais acessível sem comprometer a qualidade da captação dos sinais musculares. Além disso, o AD8232 possui amplificação e filtragem de ruído integradas, o que reduz a necessidade de circuitos adicionais e facilita a integração com microcontroladores, como o Arduino Leonardo.

Antes de iniciar a atividade, realiza-se uma calibração da sensibilidade do sensor EMG. Essa calibração é feita solicitando ao usuário que contraia o músculo com força máxima três vezes. O valor médio obtido dessas contrações máximas é então utilizado para ajustar o nível de limiar, estabelecendo como referência 50% desse valor para a ativação dos comandos no jogo. O processo de calibração é iniciado ao abrir o monitor serial do Arduino Leonardo no computador e digitar a tecla "C", dando início à coleta dos dados necessários para configurar adequadamente o limiar do sistema, a Figura 1 apresenta o processo de calibração.



```
COM3
[40:22:08.694] -> 290
[40:22:08.697] -> 324
[40:22:08.697] -> 300
[40:22:08.697] -> 304
[40:22:08.697] -> 290
[40:22:08.735] -> 299
[40:22:08.735] -> 282
[40:22:08.735] -> 311
[40:22:08.735] -> 330
[40:22:08.735] -> 309
[40:22:08.735] -> 285
[40:22:08.735] -> 273
[40:22:08.735] -> INICIANDO CALIBRAÇÃO
[40:22:08.735] -> Calibração 1: Controle o biceps ao máximo AGORA!
[40:22:08.804] -> Valor máximo registrado: 799
[40:22:08.804] -> Relaxa...
[40:22:08.735] -> Calibração 2: Controle o biceps ao máximo AGORA!
[40:22:08.813] -> Valor máximo registrado: 1023
[40:22:08.813] -> Relaxa...
[40:22:08.851] -> Calibração 3: Controle o biceps ao máximo AGORA!
```

Figura 1: Método de calibração.

Para realizar a conversão dos sinais musculares captados pelo sensor em comandos reconhecíveis pelo computador, utilizou-se o microcontrolador Arduino Leonardo, que possui como característica exclusiva a capacidade de emular diretamente comandos do teclado. Essa funcionalidade é fornecida pelo microcontrolador Atmega32u4 presente no Arduino Leonardo, permitindo uma interface direta e simplificada sem necessidade de *softwares* ou *hardwares* intermediários adicionais.

B. Desenvolvimento do Jogo Sério

O jogo sério foi desenvolvido na plataforma *Unity 2D*, utilizando a linguagem de programação *C#* para implementação das mecânicas interativas. A interface gráfica foi projetada utilizando a ferramenta *ToonSquid*, um aplicativo avançado de animação 2D desenvolvido para *iPad*, que combina a arte tradicional desenhada à mão com recursos modernos de animação por interpolação. A interface gráfica é atrativa com elementos desenhados especificamente para a temática, incluindo uma capivara como personagem principal. Os objetos do cenário representam obstáculos relacionados à Engenharia Biomédica, tais como próteses bionômicas, livros temáticos e outros temas acadêmicos. Esses elementos foram desenhados de forma personalizada para o jogo, utilizando a plataforma *Paint*, nativa do sistema operacional *Windows* com uma abordagem visual leve e descontraída, visando gerar interesse e reduzir o impacto negativo da monotonia durante as sessões de fisioterapia.

Antes do início da partida, o jogo apresenta um menu inicial com botões interativos que permitem ao profissional de saúde iniciar ou ajustar as configurações conforme as necessidades do usuário. Nesse menu, é possível definir o número máximo de saltos permitidos através de uma caixa de texto, enquanto a velocidade do jogo pode ser ajustada por meio de uma barra deslizante, permitindo personalizar a experiência conforme as capacidades individuais dos idosos.

Além disso, o jogo possui uma modalidade adicional: um minijogo de memória, que se abre logo após o paciente alcançar o número de saltos previamente configurado pelo profissional de saúde. Ele também foi desenvolvido na *Unity 2D*, utilizando a linguagem de programação *C#*. Nessa modalidade extra, o paciente interage com um jogo simples de memória, proporcionando uma variação lúdica adicional. O controle nessa etapa é realizado por meio do *mouse* do computador. Essa atividade complementar tem como objetivo estimular cognitivamente o paciente, aumentando ainda mais o engajamento no processo terapêutico.

Ao final de cada sessão, o jogo gera automaticamente um relatório através de um script implementado na plataforma *Unity*, desenvolvido em linguagem *C#*. Ao término da partida, esse script é acionado automaticamente, acessando as variáveis previamente armazenadas durante a sessão, tais como número de colisões, tempo total da atividade, quantidade de saltos realizados e configurações escolhidas pelo profissional. O script converte essas informações para um arquivo textual no formato *.txt*, permitindo que posteriormente sejam visualizadas e analisadas pelo profissional de saúde.

III. RESULTADOS

Os resultados iniciais do projeto demonstraram a viabilidade do uso da eletromiografia (EMG) como método de captura de sinais musculares para o controle do jogo sério voltado à pré-habilitação cirúrgica e reabilitação muscular em idosos. Para a realização dos testes iniciais, os eletrodos de EMG foram posicionados especificamente no ventre de cabeça longa do bíceps e na região anterior ao cotovelo, seguindo referências anatômicas para garantir uma

captura eficiente e precisa dos sinais musculares. O sinal elétrico obtido pelos eletrodos pode ser visualizado graficamente através da interface do módulo AD8232, conforme ilustrado na Figura 2.

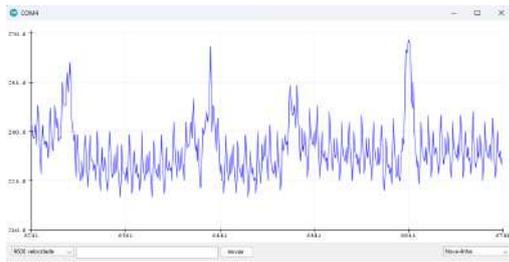


Figura 2: Sinal muscular EMG.

A Figura 3 apresenta o esquemático do circuito montado, detalhando as conexões entre o módulo EMG AD8232 e o Arduino Leonardo.

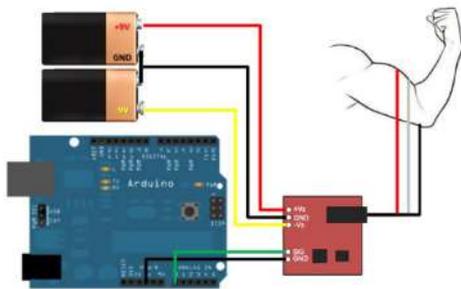


Figura 3: Esquemático sensor EMG.

Foi introduzida uma solução técnica específica para proteger o circuito: devido à sensibilidade do sensor EMG, existia o risco de queima dos capacitores presentes na placa AD8232 ao ligar o sistema diretamente com a bateria. Dessa forma, foi implementado um *switch* de proteção que permitiu controlar o momento da ativação completa do circuito, prevenindo a sobrecarga inicial e protegendo os componentes eletrônicos, como mostra a Figura 4.

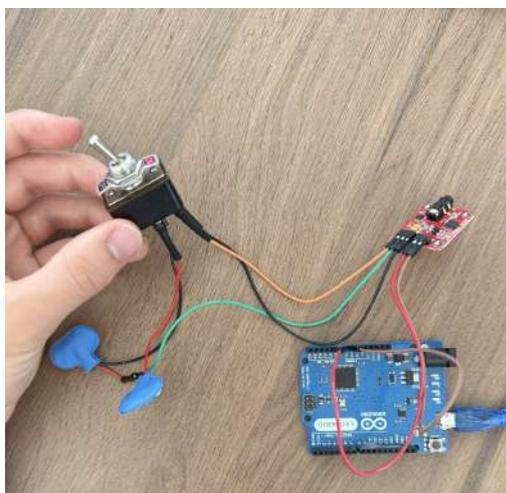


Figura 4: Módulo AD8232 conectado ao Arduino Leonardo com *switch* de proteção

O jogo principal apresenta uma interface amigável, com um menu inicial que permite ao profissional de saúde ajustar configurações importantes, como a velocidade da fase e o número de saltos necessários antes do início de cada sessão, mostrado na Figura 5.

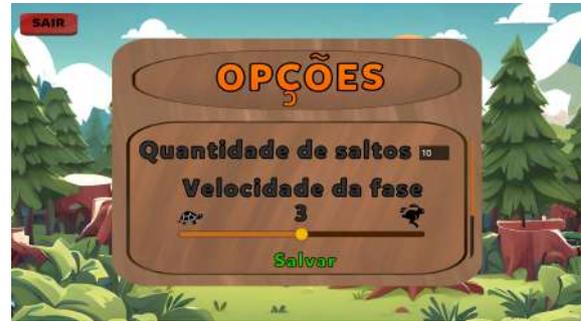


Figura 5: Tela de configurações.

Durante o jogo, quando ocorre a colisão com algum obstáculo, é emitido um *feedback* imediato visual e sonoro: a tela pisca em vermelho e um alerta sonoro é reproduzido, informando de forma clara e objetiva ao usuário sobre a colisão.

Ao final de cada sessão, o jogo gera automaticamente um relatório detalhado contendo informações sobre o desempenho do jogador, como o número de colisões, o tempo de duração da atividade, a maior sequência de acertos, a quantidade de saltos realizados e as configurações previamente escolhidas. Esse relatório é gerado em formato `.txt` e pode ser aberto em uma página `.html`, onde gráficos visuais detalhados facilitam a análise do desempenho do paciente pelos profissionais de saúde.

Durante o jogo, o número de saltos restantes é exibido no canto superior direito da tela, como mostrado na Figura 6, facilitando o acompanhamento em tempo real.

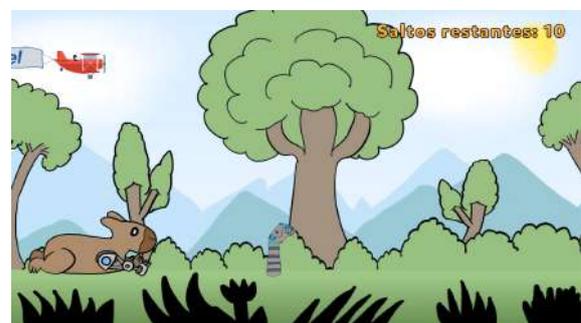


Figura 6: Interface gráfica do jogo.

O minijogo da memória consiste em oito cartas, representando quatro frutas diferentes (uva, banana, maçã e laranja), em que o jogador deve encontrar os pares correspondentes, promovendo também um estímulo cognitivo ao usuário durante as sessões, como mostrado na Figura 7.



Figura 7: Interface gráfica do jogo da memória.

Por fim, após cada sessão do jogo principal, é gerado um relatório textual com métricas como o número de colisões, tempo de conclusão das atividades, maior sequência de acertos, quantidade de saltos realizados e velocidade configurada. Esse relatório pode ser aberto em uma página contendo gráficos para facilitar a análise do desempenho dos pacientes ao longo do tempo. Os gráficos incluem as mesmas métricas do relatório textual. Esses dados são apresentados em formatos visuais intuitivos, como gráficos de linhas e gráficos de pizza, facilitando a interpretação e permitindo uma análise clara e rápida por parte dos profissionais de saúde, como demonstrado na Figura 8.



Figura 8: Relatório gráfico.

IV. DISCUSSÃO

Nesta seção, discute-se a eficácia e os desafios da utilização dos eletrodos de eletromiografia (EMG) para controle do jogo sério desenvolvido. Embora a captação dos sinais musculares tenha se mostrado eficaz na personalização e adequação às capacidades individuais dos idosos, alguns desafios técnicos merecem destaque. Entre esses desafios, ressalta-se a necessidade de uma calibração cuidadosa da sensibilidade do sensor EMG antes de cada sessão, especialmente devido à variabilidade das condições musculares dos usuários idosos. O método de calibração atual, que consiste em solicitar ao usuário três contrações com força máxima e definir o limiar como 50% do valor médio obtido, demonstrou eficácia inicial.

Além disso, a implementação do sistema de proteção por meio de um *switch* revelou-se uma estratégia eficaz e necessária para garantir a integridade do circuito EMG, prevenindo danos aos componentes eletrônicos sensíveis como os capacitores do módulo AD8232.

A possibilidade de personalizar as configurações de jogo (velocidade e quantidade de saltos) demonstrou-se essencial para ajustar o nível de dificuldade de acordo com as

necessidades individuais dos pacientes idosos. A interface gráfica amigável e o *feedback* visual e sonoro fornecidos durante as sessões tendem a ajudar na maior adesão ao tratamento, concordando com estudos prévios que destacam a importância desses elementos no engajamento de idosos em atividades terapêuticas.

Adicionalmente, o minijogo complementar de memória integra uma abordagem que alia componentes físicos e cognitivos, reforçando a eficácia terapêutica e podendo contribuir positivamente para o desempenho global do paciente.

Contudo, é fundamental considerar algumas limitações práticas identificadas, como a necessidade de interação externa para abrir relatórios em uma página *HTML* ou realizar a calibração por meio da *IDE* do Arduino.

Por fim, foram realizados testes preliminares para validação prática do sistema desenvolvido. Inicialmente, o jogo foi testado no laboratório do eHealth Innovation Center do Inatel, permitindo ajustes iniciais relacionados à captação e calibração dos sinais musculares. Posteriormente, o projeto foi apresentado publicamente na Feira Tecnológica do Inatel (FETIN), onde diversos usuários puderam experimentar a interação por meio dos eletrodos EMG. Além disso, o jogo foi demonstrado na feira acadêmica promovida pelo Instituto Nacional de Ensino Superior e Pós-Graduação Padre Gervásio (INAPÓS), realizada no Hotel Marques Plaza, em Pouso Alegre. Em todas essas ocasiões, observou-se uma boa aceitação dos participantes quanto ao método de interação e ao conceito do jogo, indicando o potencial da tecnologia utilizada, embora sejam necessários estudos clínicos futuros para validação científica completa da solução proposta.

V. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um jogo sério aplicado à pré-habilitação cirúrgica e reabilitação muscular em idosos, utilizando sensores de EMG para captação dos sinais musculares.

A possibilidade de personalizar a sensibilidade do sensor e ajustar configurações específicas do jogo, como a velocidade e o número máximo de saltos, representa um potencial para aumentar o engajamento dos usuários durante as atividades terapêuticas. Além disso, a geração automática de relatórios detalhados permite aos profissionais de saúde monitorar o desempenho dos pacientes de maneira objetiva e visualmente clara.

Contudo, recomenda-se a realização de futuros estudos clínicos mais amplos, especialmente para validar cientificamente os benefícios do jogo sério e sua aplicabilidade em diferentes contextos terapêuticos. Sugere-se também aprimorar a acessibilidade e a usabilidade do sistema por meio da simplificação do processo de calibração e da integração direta das funcionalidades, como geração de relatórios, dentro do próprio ambiente do jogo, utilizando por exemplo um servidor *web* embutido.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) pelo apoio oferecido ao projeto. Agradecemos também à Fundação Instituto Nacional de

Telecomunicações (FINATEL) pelo suporte financeiro e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Físio Intelecto. *Pré - Habilitação: como preparar os pacientes para cirurgias eletivas de grande porte?* URL: <https://www.fisiointelecto.com/2022/08/pre-habilitacao-como-preparar-os.html>.
- [2] José Miguel Tomazevic. “Revisão narrativa sobre aplicações de jogos sérios em pacientes pós-acidente vascular cerebral”. Em: *Boletim do Instituto de Saúde* (2022).
- [3] Hugo Barbosa, António Viera de Castro e Eurico Carrapatoso. *Exercícios e Jogos Sérios Aplicados à Reabilitação de Idosos*. 2017. URL: https://www.academia.edu/93077085/Exerc%C3%ADcios_e_Jogos_S%C3%A9rios_Aplicados_%C3%80_Reabilita%C3%A7%C3%A3o_De_Idosos.
- [4] Adam Mews dos Santos et al. “I Blue It: Um Jogo Sério para auxiliar na Reabilitação Respiratória”. Em: *SBC – Proceedings of SBGames 2018* (2018).
- [5] Gustavo Andrade. *Pesquisa revela dificuldade de idosos com tecnologia no trabalho*. 2024. URL: https://tribunaonline.com.br/economia/pesquisa-revela-dificuldade-de-idosos-com-tecnologia-no-trabalho-178779?utm_source=chatgpt.com&home=esp%C3%ADrito+santo.
- [6] Prof. Me. Bruno M. de Moura, Luiz Felipe Guarise Katcipis e William Souza. *Eletromiografia: o que, como e para que serve?* 2024. URL: https://biomec.paginas.ufsc.br/?page_id=171 (acedido em 16/07/2024).

AUTORES



Eduardo Pereira Valias
Graduando de Engenharia de Computação pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), bolsista de Iniciação Científica do eHealth Innovation Center.



Elisa Rennó de Carneiro Dester
Fisioterapeuta formada pela Universidade Gama Filho (RJ) em 1999; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela

Universidade Castelo Branco (RJ) em 2003; Professora do curso de pós-graduação em Engenharia Clínica e Biomédica do Inatel; Professora do curso de Engenharia Biomédica do Inatel.



Rita Elizabeth Santos de Almeida

Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, técnica em equipamentos médicos pela Escola Técnica em Eletrônica Francisco Moreira da Costa. Especialista em sistemas no Inatel, atuando

como coordenadora de projetos no eHealth Innovation Center.

COAUTORES



Pedro Rosa dos Santos
Graduando de Engenharia de Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), estagiando na NEXTEST.

Estudo do Uso do Rastreamento Ocular para Transtorno do Espectro Autista e Neuro Educação

Tiago Rodrigues Plum Ferreira, Caio Lima Ramos, Cláudio Eduardo Lemes, Prof. Filipe B. Vilela, Prof. Elisa Renno Carneiro Dester, Prof. Luma Rissatti Borges do Prado

caio.lima@ges.inatel.br, tiago.rodrigues@gec.inatel.br, claudio.e@ges.inatel.br, filipe.bueno@inatel.br, elisa.renno@inatel.br, luma.prado@inatel.br

Abstract—The scientific research project titled "Eye Tracking" investigates the application of innovative technologies to accurately capture eye movements and analyze visual interaction with a computer screen. The study leverages the Python programming language and the *Gaze Pointer* tool to develop an intelligent system capable of providing crucial insights into visual patterns. The primary goal is to deliver a real-time monitoring solution that can be implemented in educational institutions, enabling early detection of potential neurobiological conditions.

Index Terms—MediaPipe, Computer vision, Python, sport, sports analysis.

Resumo—O trabalho de Iniciação Científica intitulado "Eye Tracking" explora o uso de tecnologias inovadoras para a captura precisa dos movimentos oculares, analisando a interação visual com a tela do computador. A pesquisa utiliza a linguagem de programação Python e a ferramenta *Gaze Pointer* para o desenvolvimento de um sistema inteligente capaz de fornecer informações essenciais sobre padrões visuais. O objetivo principal é oferecer uma solução de monitoramento em tempo real que possa ser implementada em instituições de ensino, possibilitando um diagnóstico preliminar de possíveis condições neurobiológicas adversas.

Palavras chave—*Gaze Pointer*, Visão computacional, Python, Síndrome do espectro autista, Detecção visual.

I. INTRODUÇÃO

A detecção precoce e o diagnóstico preciso do Transtorno do Espectro Autista (TEA) são desafios significativos na área da saúde e da educação. Embora existam métodos tradicionais de avaliação, como questionários e observações clínicas, esses métodos frequentemente dependem de subjetividades e podem não capturar nuances importantes no comportamento e na atenção de indivíduos com TEA. Além disso, o acesso a tecnologias avançadas de *eye tracking* (rastreamento ocular) é limitado devido ao alto custo e à complexidade dos equipamentos e *softwares* disponíveis. Essas barreiras dificultam a implementação de soluções baseadas em dados objetivos e quantificáveis, que poderiam melhorar tanto o diagnóstico quanto as intervenções terapêuticas.

Nesse contexto, a captura de dados oculares surge como uma ferramenta promissora para superar essas limitações. Estudos recentes têm demonstrado que o rastreamento ocular pode fornecer *insights* valiosos sobre padrões de atenção e comportamento em indivíduos com TEA. Por exemplo, Orsati [1] utilizou essa técnica para analisar a regulação da atenção voluntária e a inibição de comportamentos em crianças com TEA, destacando sua relevância na avaliação neuropsicológica. Essa abordagem quantitativa e objetiva complementa os métodos

tradicionais de diagnóstico, permitindo uma compreensão mais aprofundada das características individuais dos pacientes.

Além do potencial diagnóstico, o rastreamento ocular tem se mostrado eficaz no aprimoramento de habilidades cognitivas, como leitura e memória, em crianças com dificuldades de aprendizagem. Em seu estudo, Chan [2] evidenciou que o treinamento baseado em *eye-tracking* pode melhorar significativamente a memória e a capacidade de aprendizado em crianças com desafios educacionais, oferecendo uma alternativa viável às intervenções tradicionais. Além de otimizar o desempenho acadêmico, essa tecnologia favorece o desenvolvimento de funções executivas essenciais, como atenção e inibição, aspectos fundamentais para o sucesso escolar e a adaptação ao ambiente educacional.

A versatilidade metodológica do rastreamento ocular amplia suas possibilidades de aplicação. Diferentes dispositivos, como *webcams*, óculos de realidade virtual e sistemas especializados, podem ser utilizados conforme as necessidades do estudo ou da intervenção. Em seus estudos, Kaliukhovich [3] explorou essa flexibilidade ao empregar um sistema de rastreamento ocular de alta precisão para avaliar a preferência por movimento biológico em indivíduos com TEA. Esse aspecto permite que pesquisadores e profissionais escolham a tecnologia mais adequada para seus objetivos, garantindo maior eficiência em contextos clínicos, educacionais e de pesquisa.

O avanço dos algoritmos de processamento de dados tem potencializado a análise das informações coletadas por meio do rastreamento ocular, possibilitando intervenções mais personalizadas e eficazes. Caldani [4] investigou o impacto de um treinamento cognitivo breve na melhoria das funções de inibição em crianças com TEA, utilizando técnicas avançadas de análise de dados oculares para avaliar mudanças no desempenho. Essas inovações facilitam a coleta e interpretação dos dados, contribuindo para a evolução das práticas terapêuticas e tornando a tecnologia mais acessível para diferentes áreas de aplicação.

Adicionalmente, a pesquisa de Jones [5], publicada no *JAMA*, demonstrou que a medição baseada em rastreamento ocular do engajamento visual social pode ser um biomarcador eficaz para o diagnóstico precoce do autismo em crianças de 16 a 30 meses. O estudo, que envolveu 475 crianças em seis centros especializados nos Estados Unidos, revelou que essa técnica apresentou uma sensibilidade de 71,0% e uma especificidade de 80,7% em relação ao diagnóstico clínico

especializado.

Diante dos recentes avanços, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta simplificada e eficiente para a detecção do autismo, utilizando a captura e interpretação de dados oculares. O objetivo é criar uma solução não apenas eficaz, mas também acessível, superando as barreiras de custo e complexidade que limitam o uso atual de tecnologias de *eye tracking*. Assim, busca-se contribuir para uma detecção mais precoce e precisa do TEA, permitindo também a implementação de intervenções personalizadas que possam melhorar a qualidade de vida dos indivíduos afetados.

II. METODOLOGIA

A. Equipamentos e Configurações do Sistema

Para o desenvolvimento do software *eye tracking* e execução dos experimentos, foi utilizado o seguinte conjunto de equipamentos e configurações:

- **Webcam:** Logitech C920, FullHD, com suporte à captura de vídeo em 60 fps.
- **Computador:** Notebook equipado com processador Intel Core i5 de 11ª geração, placa de vídeo GTX 2050 Ti e 8 GB de memória RAM.

B. Aspectos de Software

O software foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Python*, combinando diversas bibliotecas para captura e análise dos dados oculares. Segue abaixo as principais bibliotecas utilizadas:

- **Asyncio** – Permite a execução de tarefas assíncronas sem bloquear o fluxo do programa;
- **Websockets** – Estabelece uma conexão contínua entre cliente e servidor;
- **Json** – Permite a manipulação e armazenamento de dados estruturados;
- **Subprocess** – Executa comandos externos, como iniciar e encerrar o programa;
- **OS** – Interage com o sistema operacional, manipulando diretórios e arquivos;
- **Time** – Realiza pausas e marcações de tempo;
- **Matplotlib.pyplot** – Permite a criação de gráficos e visualização de dados;
- **Pandas** – Permite a manipulação e análise de dados tabulares;
- **Seaborn** – Permite a visualização avançada de dados, especialmente para mapas de calor;
- **OpenCV (Cv2)** – Permite o processamento de imagens e vídeos;
- **Tkinter** – Possibilita a criação de interfaces gráficas para permitir a interação do usuário com o software;
- **Threading** – Viabiliza a execução de processos paralelos para melhor desempenho do software.

Cada biblioteca desempenha um papel essencial na captura, processamento e visualização dos dados, facilitando a análise do comportamento ocular do usuário.

C. Gaze Pointer

O *Gaze Pointer* é um software projetado para detectar e rastrear o movimento dos olhos, permitindo interação sem o uso de dispositivos tradicionais, como teclados ou mouses. Ele utiliza tecnologias de *eye tracking* para capturar a direção do olhar do usuário e mapear sua posição na tela. No contexto deste trabalho, o *Gaze Pointer* foi empregado para coletar e processar dados oculares, garantindo a precisão e a confiabilidade na análise do foco visual dos participantes.

D. Interface Gráfica

Para permitir a interação do usuário com o software, foi desenvolvida uma interface de seleção de arquivos, possibilitando a escolha dos vídeos e imagens a serem exibidos durante a captura. A interface pode ser vista na Figura 1.



Fig. 1. Interface Gráfica

E. Coleta de Dados

Durante a execução dos testes, o software capturou os movimentos oculares e armazenou os dados em formato de coordenadas *GazeX*, *GazeY*, *HeadX*, *HeadY*, *HeadZ*, *HeadYaw*, *HeadPitch*, *HeadRoll*, *timestamp* em um arquivo *JSON*. O formato *JSON* (JavaScript Object Notation) é um padrão leve e amplamente utilizado para o armazenamento e intercâmbio de dados estruturados, permitindo fácil leitura por humanos e interpretação automática por máquinas.

As coordenadas *Gaze* são referentes aos valores da posição do olhar na tela, enquanto as coordenadas *Head* indicam o movimento da cabeça em diferentes eixos espaciais. Essas informações foram utilizadas para posterior análise e processamento, permitindo a geração de mapas de calor e outros indicadores visuais que auxiliam na interpretação dos padrões de atenção visual dos participantes.

F. Posicionamento e condições ambientais

Para a realização da calibração e captura, é necessário o posicionamento da câmera de forma centralizada e na altura dos olhos. Durante todo o período da calibração e captura, a cabeça deve permanecer estática, sendo recomendada apenas a movimentação dos olhos. A iluminação do ambiente deve ser ajustada para evitar reflexos ou sombreamento excessivo, garantindo a precisão da captura. O posicionamento adequado pode ser visualizado na Figura 2.



Fig. 2. Posicionamento do usuário durante calibração e captura.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização do teste, foi possível observar o resultado do mapeamento ocular por meio da geração do *heatmap*. As áreas de maior foco visual durante a captura são representadas por colorações mais escuras, enquanto as regiões com menor visitação pelo olhar apresentam tonalidades mais claras, conforme ilustrado na Figura 3.

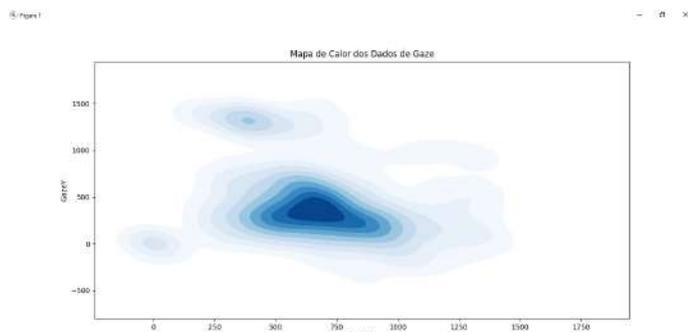


Fig. 3. Exemplo de *heatmap*

A captura e o processamento das informações obtidas via *websocket* demonstraram eficiência, com baixo tempo de latência, garantindo que o envio e recebimento dos dados ocorressem de forma praticamente instantânea. Essa característica é fundamental para viabilizar análises em tempo hábil sem interrupções.

O tempo de processamento foi limitado a 10 minutos devido à utilização da versão gratuita do *Gaze Pointer*. Entretanto, essa

restrição não comprometeu a qualidade dos resultados, uma vez que esse intervalo mostrou-se adequado para a coleta de informações relevantes e extração de insights significativos.

O mapa de calor gerado a partir dos dados capturados possibilita uma visualização clara do foco do olhar dos usuários. Essa representação gráfica facilita a interpretação dos padrões de comportamento visual e contribui para uma análise mais objetiva dos resultados.

A interface do *software*, embora simples, permite a execução eficiente dos processos necessários para a coleta e processamento de dados.

Foram realizados testes em diferentes condições de iluminação, abrangendo ambientes claros e escuros. Os resultados indicaram que a captura permaneceu fiel ao local observado, refletindo com precisão os pontos de foco visual ao longo da execução. Tanto o mapa de calor quanto o arquivo *JSON* gerado apresentaram coerência com os dados registrados, validando a eficiência do método empregado na identificação das áreas de atenção visual.

É importante ressaltar a arquitetura de software empregada nos experimentos, composta por módulos integrados que operam localmente no equipamento do usuário, sem necessidade de conexão com servidores externos. Essa abordagem garante maior controle sobre os dados coletados, além de evitar questões relacionadas à privacidade ou dependência de rede.

A integração entre os componentes do sistema foi realizada por meio de comunicação assíncrona via *websocket*, conectando o módulo de captura visual ao processador de dados. Os dados obtidos foram armazenados em arquivos no formato *JSON*, permitindo fácil leitura e posterior análise com ferramentas de visualização, como a geração de mapas de calor.

A captura e o processamento das informações obtidas via *websocket* demonstraram eficiência, com baixo tempo de latência, garantindo que o envio e recebimento dos dados ocorressem de forma praticamente instantânea. Essa característica é fundamental para viabilizar análises em tempo hábil sem interrupções.

IV. CONCLUSÃO

O projeto em questão concentrou-se no desenvolvimento de um sistema acessível de rastreamento ocular, com foco na captura e análise de dados visuais, utilizando equipamentos simples e *software open-source*. O sistema foi capaz de identificar as coordenadas oculares e gerar mapas de calor que evidenciam as áreas de maior fixação visual. Esse processo é particularmente relevante para estudos acadêmicos voltados à detecção de padrões visuais relacionados TEA e ao suporte educacional de crianças com dificuldades de leitura.

A implementação do *software* em *Python*, associada a bibliotecas amplamente utilizadas como *pandas* e *seaborn*, garantiu robustez na coleta e no processamento dos dados. Além disso, a interface gráfica baseada em *tkinter* proporcionou simplicidade e acessibilidade ao usuário, permitindo a execução dos experimentos de forma prática.

Os resultados destacaram a eficiência do sistema em termos de velocidade e precisão. Apesar de limitações, como o tempo restrito de captura devido ao uso da versão gratuita do *software GazePointer*, o intervalo disponível mostrou-se suficiente para

obter dados significativos. A visualização por meio de mapas de calor demonstrou ser uma ferramenta eficaz para interpretar e comunicar padrões comportamentais visuais.

Futuras melhorias incluem o desenvolvimento de um sistema inteligente para identificar características do TEA a partir dos dados gerados, sejam em formato JSON ou nos mapas de calor, utilizando métodos avançados como aprendizado de máquina. Além disso, a ampliação da interface gráfica visa torná-la mais intuitiva e funcional. A validação em contextos clínicos reais será essencial para consolidar a aplicabilidade do sistema em estudos e diagnósticos.

Por fim, este trabalho demonstrou o potencial de ferramentas de baixo custo e código aberto para contribuir significativamente com pesquisas acadêmicas e aplicações práticas, incentivando o desenvolvimento de soluções acessíveis para desafios complexos na área de análise visual.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) pelo apoio oferecido ao projeto. Agradecemos também à Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (FINATEL) pelo suporte e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] “NOVAS POSSIBILIDADES NA AVALIAÇÃO NEUROPSICOLÓGICA DOS TRANSTORNOS INVASIVOS DO DESENVOLVIMENTO: ANÁLISE DOS MOVIMENTOS OCULARES”. Em: (). URL: <https://pepsic.bvsalud.org/pdf/avp/v7n3/v7n3a03.pdf> (acesso em 2008).
- [2] “Eye-tracking training improves the learning and memory of children with learning difficulty”. Em: (). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18286-6> (acesso em 17/08/2022).
- [3] “Visual Preference for Biological Motion in Children and Adults with Autism Spectrum Disorder: An Eye-Tracking Study”. Em: (). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10803-020-04707-w> (acesso em 20/09/2021).
- [4] “Inhibition functions can be improved in children with autism spectrum disorders: An eye-tracking study”. Em: (). URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37218472/> (acesso em 23/05/2023).
- [5] “Eye-Tracking–Based Measurement of Social Visual Engagement Compared With Expert Clinical Diagnosis of Autism”. Em: (). URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37668621/> (acesso em 05/09/2023).

AUTORES



Caio Lima Ramos Graduando de Engenharia de Software pelo INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações). Já realizou uma iniciação científica no laboratório E-Health no inatel voltada para visão computacional. Durante o período em que esteve no INATEL, desenvolveu vários projetos em diferentes linguagens, como JavaScript, Python, C sharp, além de diversas

aplicações, como um site de comparação de preços de produtos, um jogo baseado em Pokémon. Atualmente sendo estagiário no CDG da instituição inatel.



Tiago Rodrigues Plum Ferreira

Graduando em Engenharia da Computação pelo INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações), Tiago já participou do desenvolvimento de três projetos de Iniciação Científica no E-health. O primeiro projeto focou na engenharia de tecidos, enquanto o segundo, abordado neste artigo, concentrou-se na análise de imagens para obtenção de dados no esporte. Atualmente,

Tiago está envolvido em uma pesquisa que visa criar e analisar o eye tracking para diagnóstico no neurodesenvolvimento. Além disso, participou de um projeto de IC no CDG (hub) que visa ensinar Python nas escolas de Ensino Médio, denominado Programação 1.0. Com uma paixão evidente por Python, redes neurais e análise de dados, Tiago está determinado a continuar explorando esses campos e contribuir para avanços na área da computação e saúde.



Cláudio Eduardo Lemes

Graduando em Engenharia de Software pelo INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações), Cláudio está participando do seu primeiro projeto de Iniciação Científica no E-health. Está participando de uma pesquisa dedicada ao desenvolvimento e análise do eye tracking como ferramenta para diagnóstico em neurodesenvolvimento.

Cláudio está comprometido a aprofundar seus conhecimentos na área da saúde enquanto avança no campo da programação.

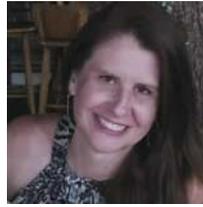


Filipe B. Vilela

Graduado em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), em Minas Gerais, Brasil, tendo feito graduação sanduíche na Milwaukee School of Engineering (MSOE), em Wisconsin, Estados Unidos da América (EUA), por meio de fomento oferecido pela CAPES. Mestre

em Materiais para Engenharia, com foco em biomateriais, pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em Minas Gerais, Brasil. Doutorando em Materiais para Engenharia, com foco em biomateriais, pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em Minas Gerais, Brasil. Professor auxiliar em Engenharia Biomédica pelo Inatel. Coordenador de projetos do centro de pesquisas em engenharia biomédica do Inatel, o eHealth Innovation Center. Professor do curso técnico de eletrônica com ênfase em equipamentos médicos pela Escola Técnica de Eletrônica “Francisco Moreira da Costa”, em Minas Gerais, Brasil. Pesquisador especialista pelo Inatel para

chamada pública do Ministério da Saúde para transferência tecnológica de aceleradores lineares e técnicas de radioterapia pela Varian Medical Systems, na Califórnia, EUA, em 2018. Pesquisador acadêmico na área de nanotecnologia e biomateriais na Illinois Institute of Technology (IIT), em Illinois, EUA, entre maio e junho de 2015. Acadêmico visitante no departamento de empreendedorismo de projetos de inovação pela Universidad de Concepción (UdC), em Bio Bio, Chile, em janeiro de 2016.



Elisa Renno Carneiro Dester Fisioterapeuta pela UGF-RJ; Mestre em Ciências da Motricidade Humana pela UCB-RJ; Professora do curso de graduação e pós graduação em Engenharia Biomédica do Inatel; Fisioterapeuta responsável pelo serviço de Fisioterapia aplicada a Saúde da Mulher do HCSL.



Luma Rissatti Borges do Prado Graduada em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, mestranda em Engenharia Biomédica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Especialista no Inatel atuando como coordenadora de projetos do eHealth Innovation Center do Inatel e líder técnica de Engenharia Biomédica do Inatel Competence Center. Professora de Design de Tecnologias Médicas do curso técnico em eletrônica da Escola Técnica de Eletrônica "FMC".

Aplicação da Fusão de Sensores Inerciais para Detecção de Ângulo de Rotação em uma Manopla de Detecção de Câncer de Mama

Rodrigo Fernandes Patta, Arthur Maximiano, Rodrigo Rech, Alexandre de Jesus Aragão
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Campus São Paulo

rodrigo.patta@aluno.ifsp.edu.br, arthur.maximiano@aluno.ifsp.edu.br, rodrigo.rech@ifsp.edu.br, alexandreja@ifsp.edu.br

Abstract—This work proposes the integration of inertial sensors embedded into a microcontroller platform to measure the rotation angle of a handheld device used in a portable microwave imaging equipment. The platform employs a 3-axis accelerometer and gyroscope to capture dynamic data on the handheld position. The measured angle is corrected by Rodrigues' formula and sensor fusion is performed by applying the Kalman filter, both incorporated into the system's firmware. Experimental results demonstrated that the use of inertial sensors together with the algorithms proposed in this work were able to reduce the handheld positioning angle error by up to 33% on average related to the present manual operation. This approach can minimize mechanical interference, contributing to more reliable diagnoses in resource-limited environments.

Index Terms—Breast Cancer, Kalman Filter, Rodrigues' Formula, Sensor Fusion, Inertial Sensors.

Resumo—Este trabalho propõe a integração de sensores inerciais embarcados em uma plataforma de microcontrolador para medir o ângulo de rotação de um dispositivo portátil usado em um equipamento de imagem por micro-ondas. A plataforma emprega um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio para capturar dados dinâmicos sobre a posição do dispositivo. O ângulo medido é corrigido pela fórmula de Rodrigues e a fusão de sensores é realizada pela aplicação do filtro de Kalman, ambos incorporados ao *firmware* do sistema. Resultados experimentais demonstraram que o uso de sensores inerciais juntamente com os algoritmos propostos neste trabalho foram capazes de reduzir o erro do ângulo de posicionamento do dispositivo portátil em até 33% em média em relação à operação manual atual. Esta abordagem pode minimizar a interferência mecânica, contribuindo para diagnósticos mais confiáveis em ambientes com recursos limitados.

Palavras chave—Câncer de Mama, Filtro de Kalman, Fórmula de Rodrigues, Fusão de Sensores, Sensores Inerciais.

I. INTRODUÇÃO

O câncer de mama é atualmente o tipo de tumor mais diagnosticado em mulheres, alcançando quase 8 milhões de diagnósticos nos últimos 5 anos. A Organização Mundial da Saúde indicou mais de 2,3 milhões de mulheres diagnosticadas e 685 mil mortes no mundo em 2020 [1]. Ao final de 2024, um estudo descreveu a predominância da mortalidade por câncer sobre as doenças cardiovasculares no Brasil [2]. A necessidade do diagnóstico precoce, com o objetivo de aumentar a possibilidade de cura, principalmente em países de baixa renda, tem levado a comunidade científica a desenvolver dispositivos que detectem o câncer de mama e apresentem baixo custo e portabilidade. Entre as opções em estudo, destaca-se a imagiologia

por micro-ondas, uma abordagem considerada promissora por ser não invasiva e segura [3].

Aragão et al. [4] propôs em 2023, o protótipo de um dispositivo de imagiologia portátil e de baixo custo para o rastreamento inicial do câncer de mama. O aparelho é posicionado em um sutiã de borracha de silicone desenvolvido para se ajustar ao seio da paciente e, em seguida, é girado manualmente em 64 ângulos equidistantes. Neste caso, o ângulo do dispositivo é ajustado de forma manual, o que aumenta a probabilidade de imprecisões na geração da imagem final do exame.

Os avanços tecnológicos nas últimas duas décadas resultaram no desenvolvimento de unidades de medição magnética e inercial de baixo custo, o que permitiu seu uso em vários campos, especificamente rastreando a orientação 3D de um corpo rígido. Apesar das recentes melhorias, as medições de um giroscópio, acelerômetro e magnetômetro são caracterizadas por incertezas. Vários estudos foram conduzidos para abordar essas incertezas e desenvolver algoritmos de fusão de sensores para estimar a orientação 3D de forma precisa e robusta. O filtro de Kalman tem sido usado de forma extensiva em diferentes aplicações envolvendo estimativas, desde a engenharia, economia, até a biologia. Na detecção de posição, o filtro de Kalman melhora a precisão com eficiência computacional [5].

Este trabalho apresenta uma aplicação da fusão de sensores inerciais para ser adicionado ao projeto de Aragão et al. [4], com o intuito de automatizar a medição de ângulo de giro da manopla e tornar a aquisição dos sinais mais precisa. Foi escolhida uma plataforma de *hardware* que possui um acelerômetro e giroscópio de 3 eixos embutidos em um único dispositivo. A medição de ângulo é realizada em ambos os sensores, e os dados são compilados. Em seguida, é realizada a fusão utilizando o filtro de Kalman [6]. A fórmula de Rodrigues [7], adaptada para correção de orientações espaciais, é aplicada para realizar o ajuste dos ângulos medidos devido à inclinação da paciente durante o exame.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção I apresenta as informações introdutórias. A Seção II detalha a metodologia utilizada no projeto. A Seção III mostra os resultados obtidos, que são discutidos na Seção IV. As conclusões são apresentadas na Seção V.

II. METODOLOGIA

A. Configuração do Sistema de Imagiologia por Micro-ondas

A Figura 1 mostra o sistema proposto em [4], que é composto por uma manopla que integra um dispositivo de imagiologia por radar utilizando micro-ondas. O equipamento opera na faixa de 3,1 a 10,6 GHz, com antenas de banda ultra-larga (*Ultra-Wideband*, UWB) posicionadas em um arranjo circular para capturar respostas dielétricas do tecido mamário.

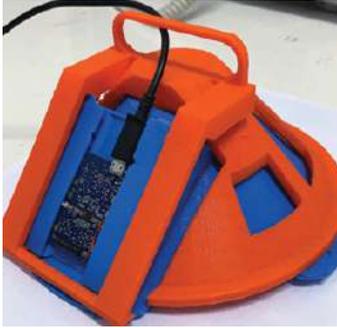


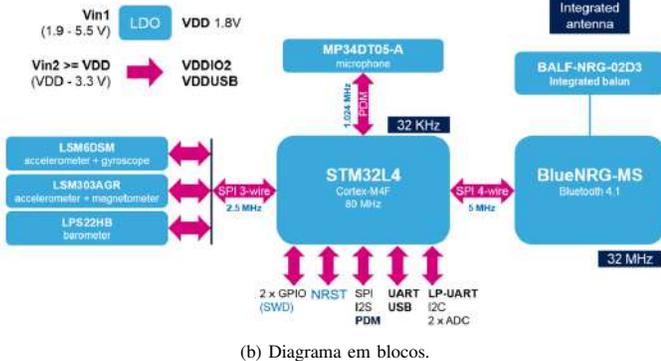
Fig. 1. Manopla desenvolvida por Aragão et al. [4]. Fonte: [4].

B. Dispositivo Integrado de Sensores Inerciais

No dispositivo mostrado na Figura 1, o ângulo de posicionamento do sensor é medido manualmente. A proposta deste trabalho é automatizar a medição do ângulo de giro utilizando o dispositivo *SensorTile* (Figura 2), integrado à manopla.



(a) Foto da plataforma.



(b) Diagrama em blocos.

Fig. 2. *SensorTile* ST Microelectronics. Fonte: [8].

O *SensorTile* é um módulo desenvolvido pela *STMicroelectronics* que reúne oito componentes essenciais em uma arquitetura compacta. O microcontrolador STM32L476JGY coordena o processamento em tempo real dos dados inerciais, enquanto o acelerômetro e giroscópio de 3 eixos LSM6DSM capturam movimentos lineares e angulares. Complementarmente, o magnetômetro LSM303AGR mede a angulação do sensor em relação ao campo magnético terrestre. Outros componentes auxiliares, como o módulo *Bluetooth* BlueNRG-MS, o sensor

de áudio MP34DT04, o regulador de tensão LD39115J18R, o barômetro LPS22HB e o transformador *balun* BALF-NRG-01D3, suportam funções secundárias, como a transmissão sem fio, sincronização temporal e estabilização de energia. A escolha do *SensorTile* é justificada por sua capacidade de combinar sensores de alta precisão, processamento embarcado e tamanho compacto, em uma plataforma de baixo custo, atendendo aos critérios de portabilidade e acessibilidade necessários para exames em ambientes com recursos limitados [9].

C. Plataforma de Desenvolvimento

No artigo escrito por Patta et al. [10], o *SensorTile* foi utilizado em um estudo de fusão de sensores inerciais para posicionamento 3D. O trabalho destacou a implementação de rotinas de *firmware* para controle de LEDs (indicadores *awake* e *alive*), configuração de *timers* no microcontrolador e desenvolvimento de comunicação serial UART entre o dispositivo e um computador. A plataforma mecânica da Figura 3, desenvolvida por Nunes, Bracco e J. Aragão [11], foi utilizada para fixar o *SensorTile* durante testes dinâmicos, garantindo estabilidade nas medições.

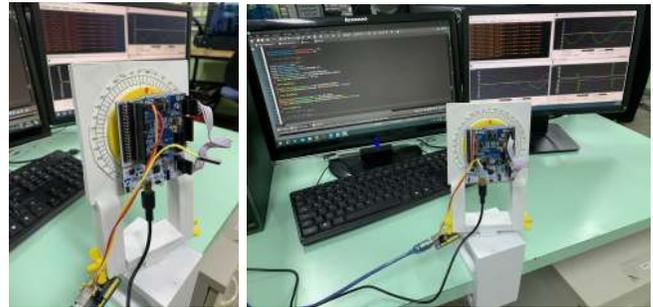


Fig. 3. Plataforma de testes capaz de rotacionar entre os planos x, y e z [11]. Fonte: [10].

O *firmware* desenvolvido na plataforma *STM32CubeIDE* inclui três etapas principais:

- 1) **Controle de LEDs:** Configuração de interrupções por *timer* para sinalizar estados operacionais (*awake* para inicialização e *alive* para operação contínua).
- 2) **Comunicação Serial UART:** Implementação de um protocolo bidirecional (*full-duplex*) com taxa de transmissão de 57600 *baud*, validado por testes de *echo* para garantir integridade dos dados.
- 3) **Leitura de Sensores:** Rotinas para aquisição de dados do acelerômetro ($\pm 2g$ a $\pm 16g$) e giroscópio ($\pm 125^\circ/s$ a $\pm 2000^\circ/s$), minimizando *drift* e ruídos.

Os dados capturados foram visualizados em tempo real por meio do *Serial Oscilloscope* [12], a Figura 4 mostra os resultados das leituras do acelerômetro. É demonstrada a alteração da aceleração da gravidade nos três eixos, conforme o sensor é movimentado.

Para representação espacial, os valores foram transmitidos à plataforma *Adafruit 3D Model Viewer* [13] (Figura 5), gerando um modelo 3D interativo (um coelho virtual) que refletia os movimentos do *SensorTile* em tempo real. A combinação dessas ferramentas permitiu a análise qualitativa e quantitativa, validando a precisão do sistema em cenários estáticos e dinâmicos.

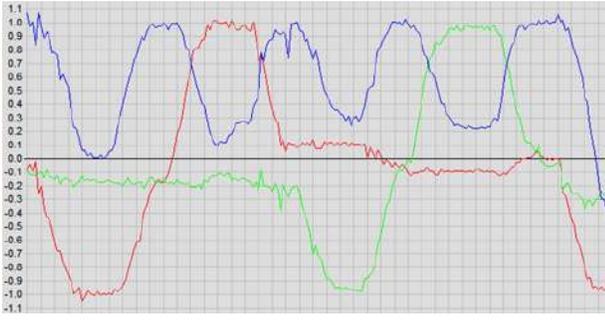
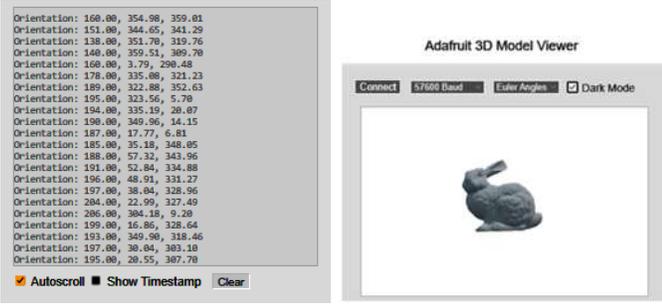


Fig. 4. Leituras do acelerômetro: Gravidade (eixo vertical, g) versus Tempo (eixo horizontal, s) [12]. Fonte: [10]



(a) Strings de dados. (b) Figura 3D em função dos sensores [13].

Fig. 5. Plataforma online Adafruit 3D Model Viewer [13]. Fonte: [10]

D. Distorção do Ângulo de Posicionamento em Função da Inclinação da Paciente

A integração do *SensorTile* com a *STM32CubeIDE* demonstrou ser uma solução eficiente para aplicações de sensoriamento inercial. A plataforma mecânica e as rotinas de *firmware* otimizaram a captura e transmissão de dados, enquanto ferramentas como o *Serial Oscilloscope* e o *Adafruit 3D Model Viewer* facilitaram a interpretação dos resultados. Entretanto, durante os testes gráficos e a análise das leituras do acelerômetro, observou-se que, no projeto de Aragão et al. [4], quando a paciente se posiciona para o exame, a angulação da manopla em relação ao plano de referência não é de 90° , mas aproxima-se de 60° . Essa inclinação introduz distorções nos cálculos de orientação baseados na Equação [1], que assume alinhamento ortogonal. Para corrigir essa deficiência, aplicou-se a fórmula de Rodrigues [7], adaptando as medições brutas às condições reais do exame. Essa abordagem compensa a discrepância angular, garantindo que os dados inerciais reflitam com precisão a posição da manopla durante o diagnóstico.

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{a_i}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (1)$$

onde θ_i é o ângulo entre o eixo i e o vetor de aceleração resultante, a_i é o componente da aceleração no eixo i e a_x , a_y e a_z são os componentes vetoriais medidos pelo acelerômetro. A correção angular minimiza distorções causadas pela postura da paciente, garantindo precisão nos dados inerciais.

E. Correção do Ângulo de Medição

Para compensar a inclinação da paciente durante o exame (aproximadamente 60° em vez de 90°), a fórmula de Rodrigues (Equação [2]) foi adaptada para corrigir as medições brutas do acelerômetro. Essa fórmula converte as orientações espaciais medidas em valores ajustados, alinhando-as ao sistema de imageamento por micro-ondas.

$$\phi_2 = \phi_1 - \arccos \left(\frac{\cos(\theta) - \cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{\sin(\theta_1) \sin(\theta_2)} \right) \quad (2)$$

onde ϕ_1 é o ângulo de orientação inicial medido pelo acelerômetro, ϕ_2 é o ângulo corrigido após a aplicação da fórmula, θ_1 e θ_2 são os componentes angulares inicial e final dos sensores no eixo XY, e θ é o ângulo de inclinação da paciente.

F. Fusão dos Sensores Inerciais

O uso do filtro de Kalman neste trabalho tem como objetivo mitigar os erros inerentes aos sensores inerciais aqui utilizados. O fluxo de fusão de dados implementado no sistema segue três etapas principais:

- 1) **Aquisição de dados brutos:** O acelerômetro fornece medidas de aceleração linear, e o giroscópio captura velocidades angulares, ambas com taxa de amostragem de 4 Hz.
- 2) **Correção de orientação espacial:** Aplicou-se a fórmula de Rodrigues adaptada (Equação [2]) para compensar a leitura de ângulos mesmo no plano inclinado (60°).
- 3) **Filtro de Kalman:** Implementado no microcontrolador STM32L476JGY, opera em duas fases:

- **Predição:** Estimativa do estado futuro (posição e orientação) via modelos cinemáticos.
- **Atualização:** Correção das estimativas usando dados dos sensores, minimizando o erro quadrático médio [6].

A Figura [6] ilustra as etapas do Filtro de Kalman, detalhando o fluxo de processamento desde a fase de predição até a atualização das estimativas. O diagrama destaca como os dados dos sensores são utilizados para corrigir a estimativa do estado, reduzindo incertezas e melhorando a precisão do sistema.



Fig. 6. Etapas do filtro de Kalman [6]. Fonte: [14].

A fusão de dados combina as vantagens complementares dos sensores: o acelerômetro fornece referências absolutas de aceleração linear, enquanto o giroscópio complementa com dados dinâmicos de rotação. O filtro de Kalman, ao integrar essas informações, suaviza ruídos e compensa *drifts*, garantindo estabilidade mesmo em ambientes com interferências mecânicas.

III. RESULTADOS

Os resultados obtidos foram organizados em três etapas principais: avaliação da precisão do acelerômetro, aplicação da correção geométrica via fórmula de Rodrigues e fusão de dados com o Filtro de Kalman.

A. Precisão do Acelerômetro em Condições Ideais

A Tabela I apresenta as medições do acelerômetro para rotações no plano vertical (a 90°), evidenciando alta precisão intrínseca do sensor. Os desvios máximos observados foram de $0,6^\circ$, com média de $0,4^\circ$, indicando adequação para medições estáticas em alinhamento geométrico ideal.

TABELA I
LEITURA REALIZADA A 90°

Posição Real	Leitura do Acelerômetro	Desvio
$0,0^\circ$	$0,5^\circ$	$0,5^\circ$
$10,0^\circ$	$9,6^\circ$	$0,4^\circ$
$20,0^\circ$	$19,7^\circ$	$0,3^\circ$
$30,0^\circ$	$29,4^\circ$	$0,6^\circ$
$40,0^\circ$	$39,7^\circ$	$0,3^\circ$
$50,0^\circ$	$49,6^\circ$	$0,4^\circ$
$60,0^\circ$	$59,4^\circ$	$0,6^\circ$
$70,0^\circ$	$69,5^\circ$	$0,5^\circ$
$80,0^\circ$	$79,7^\circ$	$0,3^\circ$

B. Compensação de desalinhamento com fórmula de Rodrigues

Em cenários clínicos reais, onde a inclinação da manopla difere do plano ideal (90°), observou-se um erro sistemático de até $9,8^\circ$ (Tabela II, posição de 80°). A aplicação da fórmula de Rodrigues permitiu reduzir os desvios para menos de $2,0^\circ$ em todas as posições, com erro médio de $0,9^\circ$. Destaca-se a correção na posição crítica de 60° , onde o erro absoluto foi reduzido de $9,8^\circ$ para $0,7^\circ$ (redução de $92,8\%$).

TABELA II
LEITURA REALIZADA A 60° COM A APLICAÇÃO DA FÓRMULA DE RODRIGUES.

Posição Real	Ângulo Sem Correção	Ângulo Com Correção	Desvio
$0,0^\circ$	$0,0^\circ$	$0,0^\circ$	$0,0^\circ$
$10,0^\circ$	$9,0^\circ$	$9,8^\circ$	$0,2^\circ$
$20,0^\circ$	$18,0^\circ$	$19,4^\circ$	$0,6^\circ$
$30,0^\circ$	$27,1^\circ$	$29,4^\circ$	$0,6^\circ$
$40,0^\circ$	$34,8^\circ$	$38,4^\circ$	$1,6^\circ$
$50,0^\circ$	$43,6^\circ$	$48,8^\circ$	$1,2^\circ$
$60,0^\circ$	$50,2^\circ$	$59,3^\circ$	$0,7^\circ$
$70,0^\circ$	$56,1^\circ$	$71,2^\circ$	$1,7^\circ$
$80,0^\circ$	$59,2^\circ$	$82,0^\circ$	$2,0^\circ$

Estes resultados demonstram que a fórmula de Rodrigues reduz o erro angular de aproximadamente $13,8\%$ para menos de 2% , validando sua capacidade de compensar desalinhamentos espaciais em condições clínicas realistas.

C. Fusão de Sensores via Filtro de Kalman

A Tabela III demonstra a eficácia do Filtro de Kalman na compensação do *drift* do giroscópio e na fusão dos dados dos sensores inerciais. Em movimento dinâmico, o giroscópio isolado acumulou erro progressivo de até $2,5^\circ$ (posição de 80°), enquanto a fusão com o acelerômetro corrigido limitou o erro máximo a $1,3^\circ$. A saída do filtro mostrou-se estável, com desvio médio de $0,6^\circ$ em relação à posição real.

TABELA III
LEITURA REALIZADA A 60° COM A APLICAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN.

Posição Real	Ângulo Sem Correção	Leitura Giroscópio	Ângulo Com Correção	Saída Filtro de Kalman
$0,0^\circ$	$0,7^\circ$	$0,6^\circ$	$0,8^\circ$	$0,7^\circ$
$10,0^\circ$	$9,4^\circ$	$10,0^\circ$	$9,9^\circ$	$9,7^\circ$
$20,0^\circ$	$16,4^\circ$	$20,1^\circ$	$18,7^\circ$	$18,7^\circ$
$30,0^\circ$	$26,7^\circ$	$30,4^\circ$	$29,7^\circ$	$29,9^\circ$
$40,0^\circ$	$35,4^\circ$	$40,8^\circ$	$38,9^\circ$	$39,0^\circ$
$50,0^\circ$	$42,6^\circ$	$49,7^\circ$	$47,6^\circ$	$49,4^\circ$
$60,0^\circ$	$49,9^\circ$	60°	$58,2^\circ$	$58,9^\circ$
$70,0^\circ$	$55,1^\circ$	$67,6^\circ$	$67,8^\circ$	$69,1^\circ$
$80,0^\circ$	$58,8^\circ$	$77,5^\circ$	$81,0^\circ$	$80,0^\circ$

A tabela III ilustra como o Filtro de Kalman suaviza oscilações e compensa o *drift*, garantindo estabilidade mesmo em cenários dinâmicos. A estratégia de fusão mostrou-se particularmente eficaz em altas angulações, onde erros cumulativos são críticos. Na posição de 80° , por exemplo, a combinação de técnicas reduziu o erro de $2,5^\circ$ (giroscópio) e $1,0^\circ$ (acelerômetro corrigido) para $0,0^\circ$ (pós-fusão), mantendo a fidelidade cinemática necessária para aplicações clínicas.

IV. DISCUSSÃO

A. Contribuições Técnicas e Relevância Clínica

A integração de sensores inerciais com imageamento por micro-ondas IR-UWB mostrou-se promissora para reduzir artefatos de movimento, um desafio crítico em sistemas de diagnóstico não invasivos. A fusão de dados via Filtro de Kalman, combinada à correção geométrica pela fórmula de Rodrigues, demonstrou três avanços principais:

- **Compensação de Interferências Dinâmicas:** A capacidade de operar em ambientes com movimento controlado (e.g., rotações de $0^\circ - 360^\circ$) sugere que a técnica é viável para uso em clínicas, onde pequenos deslocamentos do paciente são inevitáveis.
- **Adaptabilidade a Sistemas de Baixo Custo:** O uso do *SensorTile* (plataforma acessível) e microcontroladores embarcados (STM32L476JGY) indica que a solução pode ser replicada em regiões com infraestrutura limitada, alinhando-se a propostas como as de [4].

B. Comparação com Trabalhos Anteriores

Estudos como o de [11] já haviam explorado filtros digitais para posicionamento 3D, porém sem focar em aplicações médicas. Este trabalho avança ao incorporar compensação em tempo real via Filtro de Kalman, diferentemente de abordagens pós-processadas.

C. Limitações e Desafios

- **Validação em Humanos:** Testes com *phantoms*, embora úteis, não replicam totalmente a complexidade do tecido mamário humano ou variações anatômicas entre pacientes.
- **Latência em Cenários de Alta Dinâmica:** A taxa de transmissão UART (57600 *baud*) pode ser insuficiente para movimentos extremamente rápidos, exigindo protocolos de comunicação mais robustos (e.g., Bluetooth 5.0).

D. Trabalhos Futuros

- **Testes em Pacientes Reais:** Parcerias com instituições médicas para avaliar a técnica em condições clínicas reais, comparando-a com mamografias convencionais.
- **Substituição do UART:** A adoção de protocolos sem fio como BLE (*Bluetooth Low Energy*) permitiria maior flexibilidade operacional, facilitando testes em ambientes clínicos dinâmicos.

E. Implicações Práticas

- **Democratizar Diagnósticos:** Sistemas portáteis e de baixo custo baseados nesta técnica poderiam expandir o acesso a exames preventivos em áreas remotas.
- **Reduzir Custos Operacionais:** A eliminação de procedimentos invasivos e a baixa necessidade de infraestrutura complexa tornam a solução economicamente viável.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a viabilidade da integração de sensores inerciais em um sistema portátil de imageamento por micro-ondas para a detecção do câncer de mama. A implementação do filtro de Kalman associada à fórmula de Rodrigues reduziu significativamente erros decorrentes de desalinhamentos, alcançando uma precisão angular inferior a $2,0^\circ$. A utilização da plataforma *SensorTile*, com seu microcontrolador STM32L476JGY e sensores de baixo custo, torna a abordagem economicamente viável para regiões com infraestrutura médica limitada. Trabalhos futuros devem incluir a substituição da comunicação UART por protocolos sem fio (e.g., BLE) para ampliar a mobilidade e flexibilidade do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] World Health Organization. *Breast fact sheet*. Geneva, 2020. URL: <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/cancers/20-Breast-fact-sheet.pdf>.
- [2] Beatriz Rache, Rudi Rocha, Luciana Alves de Medeiros, Letícia Martins Okada, Gerson Ferrari, Hongmei Zeng, Alessandro Bigoni, Maria Paula Curado, Catarina M. Azeredo e Leandro F.M. Rezende. “Transition towards cancer mortality predominance over cardiovascular disease mortality in Brazil, 2000–2019. a population-based study”. Em: *The Lancet Regional Health – Americas* 39 (2024), p. 100904. DOI: [10.1016/j.lana.2024.100904](https://doi.org/10.1016/j.lana.2024.100904).
- [3] Alexandre de Jesus Aragão, Dionisio Carvalho, Bruno Sanches e Wilhelmus A. M. van Noije. “A Review On Microwave Imaging Systems for Breast Cancer Detection”. Em: *IEEE Access* 12 (2024), pp. 190611–190628. DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3516762](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3516762).
- [4] Alexandre de Jesus Aragão, Dionisio Carvalho, Bruno Sanches e Wilhelmus A. M. van Noije. “Low-cost device for breast cancer screening: A dry setup IR-UWB proposal”. Em: *Biomedical Signal Processing and Control* 79.Part 1 (2023), p. 104078. ISSN: 1040-7810. DOI: [10.1016/j.bspc.2022.104078](https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104078).
- [5] Kenny A. Q. Caldas, Roberto S. Inoue, Marco H. Terra, Vitor Guizilini e Fabio Ramos. “Discrete-Time Markovian Jump Linear Robust Filtering for Visual and GPS Aided Magneto-Inertial Navigation”. Em: *IEEE Access* 13 (2025), pp. 7590–7602. DOI: [10.1109/ACCESS.2025.3527449](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3527449).
- [6] Mohinder S. Grewal e Angus P. Andrews. *Kalman Filtering: Theory and Practice*. 4ª ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015. ISBN: 978-1-118-35844-0.
- [7] David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker. *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. 10ª ed. Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN: 978-85-216-2983-4.
- [8] ST Microelectronics. *LSM6DSM: Datasheet*. Acesso em: 23 jul. 2024. Suíça, 2023. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6dsm.pdf>.
- [9] ST MICROELECTRONICS. *STEVAL-STLKT01V1: Data Brief*. Suíça, 2023. URL: https://www.st.com/resource/en/data_brief/steval-stlkt01v1.pdf.
- [10] Rodrigo Fernandes Patta, Alec Fadul Cunha Yoshida, Alexandre de Jesus Aragão e Rodrigo Rech. “Estudo da plataforma *SensorTile* para uso no sensoriamento de posicionamento 3D sem fio”. Em: *Anais do Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IFSP - Campus São Paulo (EICPOG)*. São Paulo, SP: IFSP - Campus São Paulo, 2024, pp. 1–5. URL: <https://www.even3.com.br/anais/eicpog2024/904856-ESTUDO-DA-PLATAFORMA-SENSORITILE-PARA-USO-NO-SENSORIAMENTO-DE-POSICIONAMENTO-3D-SEM-FIO> (acesso em 26/02/2025).
- [11] C. S. Nunes, T. P. D. Bracco e A. de J. Aragão. “Análise de filtros digitais de resposta de impulso infinito para uso em sistemas de posicionamento 3d”. Em: *VIII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação (EICPOG)*. São Paulo: Instituto Federal de São Paulo (IFSP), 2023, pp. 385–390. URL: https://drive.google.com/file/d/1_xFRKgyD6np_JjQx_keoPjSpgSSpjqls/view.
- [12] x-io Technologies Ltd. *Serial Oscilloscope*. UK, 2024. URL: <https://x-io.co.uk/serial-oscilloscope/>.
- [13] Adafruit Ind. *Adafruit 3D Model Viewer*. UK, 2024. URL: https://adafruit.github.io/Adafruit_WebSerial_3DModelViewer/.
- [14] Luiz Henrique Barbosa Filho. *Filtro de Kalman*. <https://analismacro.com.br/mercado-financeiro/filtro-de-kalman/>. Acessado em: 06 mar. 2025. 2023.

AUTORES



Rodrigo Fernandes Patta é estudante do curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus São Paulo (IFSP) e aluno de iniciação científica no laboratório de sistemas embarcados do IFSP (*Embedded Lab*), com foco no desenvolvimento de soluções inovadoras para sistemas embarcados, sensoriamento 3D

e transmissão de dados sem fio.



Arthur Maximiano é estudante do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo (IFSP) e aluno de iniciação científica no laboratório de sistemas embarcados do IFSP (*Embedded Lab*). Sua pesquisa é focada em sistemas embarcados, com ênfase na fusão de sensores inerciais com trans-

missão via *Bluetooth* e no controle de temperatura utilizando *FreeRTOS*. Atualmente, trabalha em uma empresa do ramo de rastreamento e telemetria, desenvolvendo e aprimorando soluções embarcadas, atuando tanto no projeto de hardware quanto na implementação de *firmware*.



Rodrigo Rech possui graduação em Automação Industrial pelo Instituto Federal de São Paulo (2011), especialização em Automação Industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica (2015) e mestrado em Automação e Controle de Processos pelo Instituto Federal de São Paulo (2018). Atualmente é professor do Instituto Federal de São Paulo, integrante do laboratório de sistemas em-

barcados do IFSP Campus São Paulo e coordenador do laboratório *Maker* do IFSP Campus São Paulo. Tem experiência na área de sistemas embarcados e linguagens de programação estruturadas.



Alexandre de Jesus Aragão recebeu o título superior de Tecnologia em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos (1998) pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP), São Paulo, Brasil, mestrado em Microeletrônica (2005) e doutorado em Ciências (2021) pela Universidade de São Paulo

(USP), São Paulo, Brasil.

Atualmente trabalha como professor titular e pesquisador do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), onde começou como professor em 2006. Com quase 30 anos de experiência em eletrônica, sistemas embarcados, microprocessadores, microcontroladores e linguagens de programação estruturadas e orientadas a objetos; atualmente, sua pesquisa envolve dispositivos de imagiologia por microondas de baixo custo para detecção de câncer de mama. Além disso, ele também é cofundador e lidera o laboratório de sistemas embarcados do IFSP.

Localizador Apical Inteligente: Design Voltado para a Praticidade e Eficiência em Tratamentos Endodônticos

Facundo Calderon Cavero
Universidad Privada del Valle - UNIVALLE
ccf0029599@est.univalle.edu

Abstract—This paper explores the development and evaluation of a novel electronic apex locator designed to improve precision and ease of use in endodontic procedures. The device aims to enhance the accuracy of root canal length measurements while ensuring patient safety. It incorporates an intuitive user interface and allows for remote calibration and monitoring, optimizing workflow efficiency for dental professionals. *In vitro* trials validate the reliability of the device, demonstrating its potential to contribute to more effective and predictable endodontic treatments. The findings suggest that this next-generation apex locator can significantly enhance clinical outcomes by providing consistent and precise measurements.

Index Terms—Apex locator, Endodontics, Root canal, Root canal treatment.

Resumo—Este artigo explora o desenvolvimento e a avaliação de um novo localizador apical eletrônico projetado para melhorar a precisão e a facilidade de uso em procedimentos endodônticos. O dispositivo visa aumentar a precisão das medições do comprimento do canal radicular, garantindo ao mesmo tempo a segurança do paciente. Ele incorpora uma interface de usuário intuitiva e permite calibração e monitoramento remotos, otimizando a eficiência do fluxo de trabalho para profissionais de odontologia. Testes *in vitro* validam a confiabilidade do dispositivo, demonstrando seu potencial para contribuir com tratamentos endodônticos mais eficazes e previsíveis. Os resultados sugerem que este localizador apical de próxima geração pode melhorar significativamente os resultados clínicos, fornecendo medições consistentes e precisas.

Palavras chave—Endodontia, Conduito radicular, Localizador apical, Tratamento de canal radicular.

I. INTRODUÇÃO

O tratamento endodôntico é um ramo fundamental da odontologia, focado no diagnóstico e tratamento de doenças da polpa dentária e dos tecidos periapicais circundantes[1]. A terapia de canal radicular, um dos procedimentos endodônticos mais comuns, tem como objetivo remover a polpa infectada ou danificada, desinfetar o sistema de canais e preenchê-lo com um material biocompatível para prevenir a reinfecção. O sucesso desse procedimento depende fortemente da determinação precisa do comprimento de trabalho—a distância de um ponto de referência coronário predeterminado até a constrição apical do canal radicular. A falha em medir esse comprimento com precisão pode resultar em superinstrumentação, levando a danos nos tecidos periapicais, ou subinstrumentação, que pode deixar tecido infectado dentro do canal, potencialmente causando falha no tratamento [2].

Tradicionalmente, métodos radiográficos têm sido utilizados para determinar o comprimento de trabalho. No entanto, esses

métodos apresentam limitações, incluindo distorção, dificuldade em visualizar a constrição apical e exposição à radiação ionizante. Para enfrentar esses desafios, os localizadores apicais eletrônicos (LAEs) tornaram-se ferramentas essenciais na endodontia [3]. Os LAEs utilizam medições de impedância elétrica para determinar a posição da lima dentro do canal radicular com alta precisão. Ao longo dos anos, esses dispositivos evoluíram por várias gerações, com cada nova iteração aprimorando a precisão, a usabilidade e a adaptabilidade a diferentes condições do canal [4].

Os primeiros LAEs eram baseados em medições de resistência de frequência única, que exigiam um ambiente seco para funcionar adequadamente. Gerações posteriores introduziram medições baseadas em impedância, permitindo a operação em condições úmidas[5]. Os modelos mais avançados atualmente empregam técnicas de impedância multifrequencial, compensando variações nas condições do canal, como a presença de irrigantes e tecidos orgânicos. Esses LAEs modernos melhoraram significativamente a precisão na determinação do comprimento de trabalho, reduzindo a necessidade de radiografias repetidas e minimizando erros procedimentais [6].

Apesar desses avanços, desafios permanecem na integração perfeita dos LAEs nos fluxos de trabalho clínicos[7]. Muitos dispositivos ainda dependem de calibração manual, possuem capacidades de exibição limitadas e carecem de recursos de conectividade. Além disso, variações na morfologia dentária e a presença de restaurações metálicas podem, por vezes, interferir nas medições[8]. Este estudo apresenta um localizador apical inovador, projetado para abordar essas questões ao oferecer uma interface altamente precisa e amigável, com recursos de conectividade aprimorados, incluindo calibração remota e monitoramento em tempo real. Ao melhorar esses aspectos, o dispositivo proposto visa otimizar os procedimentos endodônticos, reduzir os tempos de tratamento e melhorar os resultados para os pacientes.

II. DESIGN DO SISTEMA E FUNCIONALIDADES

O design do sistema foi desenvolvido com foco em usabilidade, precisão e integração entre hardware e software.

A. Sistema de Medição

O dispositivo emprega uma técnica de medição de impedância multifrequencial para determinar com precisão a posição do ápice radicular. O microcontrolador ESP32 gera sinais de frequência alternada de 500 Hz e 9 kHz, ciclando a

uma taxa de 75 Hz, e processa os sinais de forma analógica para manter uma corrente segura constante de 0,03 mA [9]. Os valores de impedância são medidos em cada frequência, e um modelo computacional determina a profundidade da lima dentária dentro do canal. Esse processo de medição garante alta precisão, enquanto monitora parâmetros elétricos para manter a segurança do paciente e evitar exposição excessiva à corrente.

B. Interface do Usuário e Exibição

O dispositivo possui uma tela LCD TFT de 2,8 polegadas que apresenta medições em tempo real em um formato gráfico intuitivo. Uma barra segmentada fornece uma representação visual da distância restante até o ápice radicular, garantindo uma interpretação rápida e fácil representado na figura 1. Além disso, um sistema de feedback sonoro aumenta a frequência do alarme de 1 Hz para 10 Hz à medida que a lima se aproxima do ápice, aumentando a precisão e reduzindo o risco de superinstrumentação.



Fig. 1. Interface LCD. Barra de Progresso Exibindo a Medição.

C. Gerenciamento de Energia

O sistema é alimentado por uma bateria de íon-lítio de 2600 mAh, garantindo operação prolongada sem interrupções. O dispositivo suporta carregamento via micro USB devido à disponibilidade de módulos de carregamento padrão, mas pode ser facilmente atualizado para USB-C para maior compatibilidade com sistemas de carregamento modernos. Essa solução de energia flexível garante que os clínicos possam usar o dispositivo continuamente em ambientes clínicos movimentados.

D. Calibração Remota e Gerenciamento de Múltiplos Dispositivos

Uma interface baseada na web permite a calibração remota e o monitoramento em tempo real de até quatro dispositivos simultaneamente. Esse recurso permite que os clínicos acompanhem as medições de impedância de vários dispositivos, ajustem as configurações de calibração e otimizem o desempenho sem intervenção manual. A interface web representada na figura 2 melhora a eficiência do fluxo de trabalho, reduzindo a necessidade de ajustes físicos, especialmente em clínicas odontológicas com múltiplas cadeiras.

E. Hardware e Montagem

O dispositivo é encapsulado em uma caixa impressa em 3D, projetada usando o Autodesk Fusion e fabricada com material

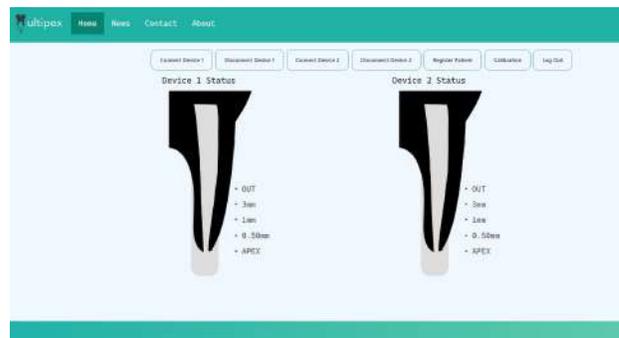


Fig. 2. Interface Web. Barras de Progresso para Dois Dispositivos.

PLA branco. A estrutura oferece durabilidade e manuseio ergonômico, garantindo facilidade de uso em ambientes clínicos. O sistema transmite sinais multifrequenciais por meio de um cabo conectado à lima dentária. Esses sinais passam pelos tecidos dentários e são recebidos por um clipe labial, que são então processados pelo microcontrolador ESP32. Tanto o clipe labial quanto a lima dentária são conectados ao dispositivo por meio de um conector jack de 3,5 mm padrão, garantindo compatibilidade com conectores periféricos já utilizados em instrumentos endodônticos.

III. TESTES E VALIDAÇÃO *In Vitro*

Para garantir a confiabilidade e precisão do sistema, uma série de validações e testes foram realizados. Esses procedimentos incluíram a verificação do funcionamento do hardware, a calibração dos sensores e a avaliação da precisão das medições.

A. Configuração Experimental

A configuração experimental envolveu as seguintes etapas:

a.1) Preparação das Amostras:

Dentes humanos extraídos foram coletados, limpos e armazenados em solução salina para manter a hidratação. Os dentes foram então embebidos em um meio condutivo à base de alginato, replicando as propriedades elétricas dos tecidos periodontais. Como visto na Figura 3, a distribuição dos erros experimentais mostra a precisão e a variação das medições realizadas.



Fig. 3. Amostra Preparada. Dente Extraído Suspenso em Alginato. Fonte: elaboração própria

a.2) Procedimento de Medição:

Um protocolo padronizado foi seguido para medir o comprimento de trabalho. O localizador apical eletrônico foi conectado a cada dente, e as medições foram realizadas em várias proximidades do forame apical (por exemplo, 0 mm e 0,5 mm). Cada medição foi repetida várias vezes para avaliar a consistência (Tabela I).

TABELA I

MEDIÇÕES ADC E ERROS PARA PROXIMIDADES DE 0 MM E 0.5 MM. FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA COM USO DO EXCEL

Nº	Medição a 0 mm (ADC)	Erro a 0 mm (ADC)	Medição a 0.5 mm (ADC)	Erro a 0.5 mm (ADC)
1	1269.52	-13.68	1155.8	-16.2
2	1298.81	15.61	1189.9	17.9
3	1270.12	-13.08	1157.1	-14.9
4	1274.92	-8.28	1161.6	-10.4
5	1296.32	13.12	1183.3	11.3
6	1266.82	-16.38	1150.9	-21.1
7	1290.72	7.52	1185.7	13.7
8	1276.02	-7.18	1163.4	-8.6
9	1285.42	2.22	1174.2	2.2
10	1292.92	9.72	1180.5	8.5
11	1280.52	-2.68	1168.9	-3.1
12	1299.12	15.92	1188.1	16.1
13	1267.32	-15.88	1159.3	-12.7
14	1300.92	17.72	1190.8	18.8
15	1268.62	-14.58	1160.7	-11.3
16	1294.22	11.02	1186.4	14.4
17	1272.72	-10.48	1162.2	-9.8
18	1288.12	4.92	1178.6	6.6
19	1271.92	-11.28	1165.5	-6.5
20	1275.62	-7.58	1169.1	-2.9
21	1297.82	14.62	1187.3	15.3
22	1265.92	-17.28	1156.6	-15.4
23	1287.22	4.02	1177.9	5.9
24	1291.62	8.42	1179.7	7.7
25	1293.32	10.12	1181.4	9.4
26	1269.92	-13.28	1164.8	-7.2
27	1273.42	-9.78	1167.3	-4.7
28	1278.32	-4.88	1172.6	0.6
29	1282.12	-1.08	1176.9	4.9
30	1295.52	12.32	1182.1	10.1
31	1277.72	-5.48	1171.2	-0.8
32	1289.42	6.22	1173.8	1.8
33	1284.82	1.62	1175.5	3.5
34	1290.22	7.02	1177.3	5.3
35	1270.72	-12.48	1166.7	-5.3
36	1299.72	16.52	1189.2	17.2
37	1266.12	-17.08	1155.3	-16.7
38	1292.32	9.12	1181.9	9.9
39	1286.62	3.42	1170.4	-1.6
40	1274.32	-8.88	1164.1	-7.9
41	1294.92	11.72	1184.6	12.6
42	1268.02	-15.18	1158.5	-13.0

a.3) Coleta de Dados:

As leituras do conversor analógico-digital (ADC) do dispositivo foram registradas, e a proximidade do ápice foi calculada usando a equação linear I:

$$\text{Proximidade (mm)} = -0,004543 \times \text{ADC} + 5,830 \quad (1)$$

B. Métricas de Desempenho

As seguintes métricas estatísticas foram calculadas para avaliar o desempenho do dispositivo:

b.1) Resultados estatísticos para proximidade de 0 mm

TABELA II

RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA PROXIMIDADE DE 0 MM (ÁPICE ALCANÇADO). FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA COM USO DO EXCEL

Métrica	Valor
Erro Médio (Viés)	0,00 mm (nenhum desvio sistemático)
Erro Absoluto Médio (MAE)	0,05 mm (baixo desvio médio)
Erro Quadrático Médio (RMSE)	0,06 mm (magnitude do erro)
Desvio Padrão	0,04 mm (alta precisão)

Os resultados da Tabela II mostram que, quando o ápice é alcançado (0 mm de proximidade), o dispositivo não apresenta desvio sistemático (viés de 0,00 mm). O Erro Absoluto Médio (MAE) de 0,05 mm e o Erro Quadrático Médio (RMSE) de 0,06 mm indicam uma magnitude de erro muito baixa, enquanto o desvio padrão de 0,04 mm confirma a alta precisão do dispositivo.

b.2) Resultados estatísticos para proximidade de 0.5 mm

TABELA III

RESULTADOS ESTATÍSTICOS PARA PROXIMIDADE DE 0,5 MM. FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA COM USO DO EXCEL

Métrica	Valor
Erro Médio (Viés)	-0,01 mm (subestimação leve)
Erro Absoluto Médio (MAE)	0,07 mm
Erro Quadrático Médio (RMSE)	0,09 mm
Desvio Padrão	0,06 mm

Conforme apresentado na Tabela III, para uma proximidade de 0,5 mm do ápice, o dispositivo apresenta uma leve subestimação (viés de -0,01 mm). O MAE de 0,07 mm e o RMSE de 0,09 mm demonstram que o erro permanece dentro de limites clinicamente aceitáveis. O desvio padrão de 0,06 mm reforça a consistência das medições, mesmo em condições mais desafiadoras.

b.3) Interpretação dos Resultados

A validação *in vitro* demonstrou que o localizador apical desenvolvido fornece medições altamente precisas e consistentes.

- **Precisão:** O baixo erro médio e o MAE indicam que o dispositivo se aproxima muito do comprimento de trabalho real, minimizando o risco de super ou subinstrumentação.
- **Exatidão:** Os pequenos valores de desvio padrão sugerem que as medições repetidas são altamente consistentes.
- **Confiabilidade:** O baixo RMSE confirma que o erro geral de medição permanece dentro de limites clinicamente aceitáveis.

Esses resultados sugerem que o localizador apical desenvolvido é uma ferramenta confiável para determinar o comprimento de trabalho em tratamentos endodônticos, podendo melhorar a eficiência clínica e as taxas de sucesso do tratamento.

IV. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste projeto demonstrou a viabilidade de um sistema integrado para medições de proximidade com alta precisão e usabilidade. Através da combinação de hardware calibrado e interfaces intuitivas (LCD e web), foi possível alcançar resultados confiáveis e consistentes, como evidenciado

pelos testes de validação. A análise dos erros experimentais mostrou que o sistema é capaz de operar dentro dos limites de tolerância esperados, tanto para medições a 0 mm quanto a 0.5 mm. Além disso, as interfaces projetadas proporcionaram uma experiência de usuário eficiente, permitindo a visualização clara dos dados e o monitoramento remoto. Futuras melhorias podem incluir a expansão do sistema para suportar mais dispositivos e a implementação de algoritmos de correção de erros para aumentar ainda mais a precisão. Em suma, este projeto representa um avanço significativo na integração de tecnologias para aplicações de medição de proximidade.

REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Murray e W. P. Saunders. “Root canal treatment and general health: A review of the literature”. Em: *International Endodontic Journal* 33 (1 2000), pp. 1–18. ISSN: 01432885. DOI: [10.1046/j.1365-2591.2000.00293.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2000.00293.x).
- [2] F. Goldberg. *Endodoncia: Técnica y fundamentos*. Panamericana, 2005, pp. 83–85.
- [3] Harpreet Singh e Pooja Kapoor. “Generations of apex locators: which generation are we in?” Em: *Stomatological Disease and Science* 2019 (mar. de 2019). DOI: [10.20517/2573-0002.2018.16](https://doi.org/10.20517/2573-0002.2018.16).
- [4] Chihiro Kobayashi e Hideaki Suda. “New Electronic Canal Measuring Device Based on the Ratio Method”. Em: *Journal Of Endodontics* 20 (3 1994), pp. 111–114. DOI: [10.1016/S0099-2399\(06\)80053-1](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(06)80053-1).
- [5] Azhar Iqbal, Thani Al Sharari, Osama Khattak, Farooq Ahmad Chaudhry, Alzarea K. Bader, Muhammad Mudassar Saleem, Rakhi Issrani, Ibrahim T. Almaktoom, Raghad Fayez H. Albalawi e Ebtahal Dhyab M. Alserhani. *Guided Endodontic Surgery: A Narrative Review*. Abr. de 2023. DOI: [10.3390/medicina59040678](https://doi.org/10.3390/medicina59040678).
- [6] M P J Gordon e N P Chandler. “Electronic apex locators”. Em: *International Endodontic Journal* 37 (2004), pp. 425–437. DOI: [10.1111/j.1365-2591.2004.00835.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00835.x).
- [7] A Y Kaufman, S Keila e M Yoshpe. *Accuracy of a new apex locator: an in vitro study*. 2002. DOI: [10.1046/j.1365-2591.2002.00468.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2002.00468.x).
- [8] FatmaMABu Naeem, SaiedM Abdelaziz e GeraldineM Ahmed. “ACCURACY OF APEX LOCATORS VERSUS RADIOGRAPHIC METHOD IN WORKING LENGTH DETERMINATION: A SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS.” Em: *International Journal of Advanced Research* 5 (11 nov. de 2017), pp. 506–518. ISSN: 23205407. DOI: [10.21474/IJAR01/5796](https://doi.org/10.21474/IJAR01/5796). URL: <http://www.journalijar.com/article/20852/accuracy-of-apex-locators-versus-radiographic-method-in-working-length-determination:-a-systematic-review-and-meta-analysis/>.
- [9] Kuo-Sheng Cheng e Min-Wei Huang. “A Multi-Frequency Current Source For Bioimpedance Application”. Em: (2006). URL: <https://www.researchgate.net/publication/242762833>.

AUTORES

Facundo Calderón Cavero

Facundo Calderón Cavero é um estudante de Engenharia Biomédica na Universidade Privada do Vale (UNIVALLE), na Bolívia, onde está cursando sua graduação. Ganhador de vários reconhecimentos nacionais e internacionais, ele publicou um artigo no IEEE Xplore após participar como expositor no 3º Congresso Inter-



nacional de Engenharia Biomédica e Bioengenharia de 2024. Facundo também desenvolveu projetos inovadores na empresa de inovação tecnológica UMA, vinculada à UNIVALLE, aplicando conhecimentos em energia, eletrônica, robótica e biomateriais. Com habilidades em programação, modelagem 3D e sistemas de controle, além de fluência em espanhol e inglês avançado, ele se destaca como um profissional promissor e dedicado à inovação na área biomédica.

Ambiente Personalizado para Aplicação de Técnicas de Aprendizado por Reforço na Categoria IEEE VSSS

Davi Rosim and Felipe A. P. de Figueiredo
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
davi.rosim@ges.inatel.br, felipe.figueiredo@inatel.br

Abstract—This paper presents VSS-Env, an open-source framework developed for applying Reinforcement Learning (RL) techniques in the IEEE Very Small Size Soccer (VSSS) category. VSS-Env provides an interface with the FIRASim simulator, allowing training and evaluation of intelligent agents in a robotic soccer environment. We discuss the advantages of using RL for real-time decision-making and detail the framework's implementation, components, and potential extensions.

Index Terms—Reinforcement Learning, Robotic Soccer, Multi-Agent Systems, Simulation

Resumo—Este artigo apresenta o VSS-Env, um framework open-source desenvolvido para a aplicação de técnicas de Reinforcement Learning (RL) na categoria IEEE Very Small Size Soccer (VSSS). O VSS-Env fornece uma interface integrada com o simulador FIRASim, permitindo o treinamento e a avaliação de agentes inteligentes em um ambiente de futebol de robôs. Discutem-se as vantagens do uso de RL para tomada de decisão em tempo real, detalhando a implementação do framework, seus componentes e possíveis extensões.

Palavras chave—Aprendizado por Reforço, Futebol de Robôs, Sistemas Multiagentes, Simulação

I. INTRODUÇÃO

O campo de *Reinforcement Learning* (RL) [1], juntamente com *Machine Learning* e *Deep Learning*, tem alcançado avanços significativos em problemas complexos de tomada de decisão em tempo real. Técnicas avançadas de RL superaram o desempenho humano em diversos jogos, como Atari, Go, StarCraft II e Dota 2 [2, 3, 4, 5], demonstrando sua capacidade de aprendizado e adaptação a ambientes dinâmicos. Na robótica, RL tem-se mostrado promissor em tarefas que vão desde planejamento de movimento e otimização até manipulação e controle de sistemas autônomos, tanto em ambientes simulados quanto no mundo real [6, 7, 8].

No contexto do *IEEE Very Small Size Soccer* (VSSS), uma categoria de futebol de robôs autônomos, onde duas equipes competem com três robôs cada, cooperando para marcar mais gols do que o time adversário, conforme ilustrado na figura 1. Apresenta-se desafios únicos, como a necessidade de decisões rápidas, desvio de obstáculos, coordenação multi-agente e restrições computacionais, tornando a aplicação de RL uma tarefa árdua. Apesar do sucesso de abordagens heurísticas e controle determinístico nesta categoria, a adoção de RL ainda é limitada devido à falta de ferramentas específicas que integrem simuladores eficientes com técnicas de aprendizado.

Este artigo apresenta o VSS-Env, um *framework open-source* desenvolvido para facilitar a aplicação e o teste de algoritmos de RL no VSSS. O VSS-Env fornece uma interface integrada



Fig. 1. Campo do VSSS com dois times.

com o simulador *FIRASim*, permitindo a criação de cenários de aprendizado personalizados, suportando tanto treinamento *single-agent* quanto *multi-agent*. Com essa ferramenta, pesquisadores e desenvolvedores podem explorar novas estratégias de aprendizado e controle para robôs autônomos, contribuindo para o avanço da inteligência artificial aplicada ao futebol de robôs.

Para possibilitar a pesquisa e desenvolvimento de estratégias de controle para o VSSS, foi utilizado o *FIRASim* [2], um simulador amplamente utilizado na comunidade de robótica, que deriva do *GrSim* [9], simulador presente nas categorias de robótica da *RoboCup*. O *FIRASim* reproduz com alta fidelidade as dinâmicas da categoria, incluindo robôs e campo parametrizados, movimentações, colisões e atritos presentes no mundo real, permitindo a realização de experimentos sem a necessidade de hardware físico. Além disso, ele fornece interfaces para a comunicação entre softwares, facilitando a comunicação com implementações e testes de algoritmos de inteligência artificial. No entanto, o *FIRASim* não possui suporte nativo para RL, o que exige a criação de ferramentas intermediárias para permitir sua integração com técnicas de aprendizado por reforço.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

O uso de RL na robótica tem sido amplamente estudado, e diversas plataformas foram desenvolvidas para permitir a aplicação e validação de algoritmos de aprendizado por reforço. Frameworks como *OpenAI Gym*, *Gymnasium/PettingZoo* e simuladores especializados, como o *DeepMind MuJoCo Multi-Agent Soccer Environment* [10], são amplamente utilizados para testar agentes inteligentes. No entanto, esses ambientes não atendem completamente às necessidades do futebol de



Fig. 2. Interface gráfica do simulador FIRASim

robôs, pois carecem de extensibilidade para diferentes cenários, suporte a simulações realistas de robôs físicos e consistência nos resultados obtidos.

No domínio do futebol de robôs, existem frameworks voltados para categorias como RoboCup Soccer 2D [11], Google Research Football Environment [12] e RoboCup Soccer 3D, que permitem simulações de partidas. Contudo, esses ambientes utilizam ações de alto nível, limitando sua aplicabilidade a ligas reais, como o IEEE Very Small Size Soccer (VSS). Embora a liga RoboCup 3D ofereça ações de baixo nível e um ambiente mais realista, ainda não há frameworks específicos que permitam a criação de cenários customizados para experimentação em RL.

Simuladores tradicionais, como SSL e FIRASim, são amplamente adotados na pesquisa em futebol de robôs e oferecem interfaces gráficas ricas para o desenvolvimento de algoritmos. No entanto, para aplicações em RL, a preferência recai sobre velocidade de simulação e comunicação síncrona, aspectos muitas vezes negligenciados nesses simuladores. Além disso, muitos estudos anteriores que aplicaram RL ao futebol de robôs não disponibilizaram abertamente seus simuladores e configurações de ambiente, dificultando a reprodutibilidade dos experimentos e a validação de novas abordagens.

Neste contexto, o VSS-Env busca preencher essa lacuna ao fornecer um framework dedicado à aplicação de RL no VSS. Diferentemente de frameworks anteriores, ele permite a criação de cenários personalizados, integra-se ao simulador FIRASim e oferece suporte a técnicas de aprendizado single-agent e multi-agent. Com isso, o VSS-Env possibilita o desenvolvimento e a validação de agentes inteligentes para o futebol de robôs, promovendo a pesquisa e inovação na área.

III. VSS-ENV FRAMEWORK

O **VSS-Env** foi desenvolvido em Python, seguindo princípios de modularidade, extensibilidade e boas práticas de desenvolvimento de softwar. Ele integra a API Gymnasium/PettingZoo, oferecendo um ambiente configurável para treinamento de agentes baseados em ****Reinforcement Learning (RL)**** no contexto do IEEE Very Small Size Soccer (VSS). A arquitetura do framework é organizada em módulos bem definidos, garantindo reuso de código, facilidade de manutenção e escalabilidade.

A. Módulo de Comunicação (*clients/*)

O módulo *clients* é responsável por gerenciar a comunicação entre o **VSS-Env*** e o simulador **FIRASim**. Ele estabelece a conexão, envia comandos aos robôs e recebe informações sobre o estado do jogo.

- **client.py** - Classe abstrata que define a interface de comunicação do cliente com o simulador.

a.1) Submódulo de Simulação (*clients/sim/*)

Este submódulo contém componentes essenciais para a interação do framework com o ambiente simulado.

- **actuator.py** - Responsável pelo envio de comandos para movimentação dos robôs no FIRASim.
- **replacer.py** - Controla a reposição de objetos no campo, garantindo que os agentes possam ser reposicionados durante o treinamento.
- **vision.py** - Processa os dados da visão computacional simulada, fornecendo informações sobre a posição da bola e dos robôs.

B. Módulo de Entidades (*entities/*)

O módulo *entities* contém as classes que representam os principais elementos do jogo. Ele encapsula as propriedades da bola, dos robôs e do campo, permitindo fácil manipulação desses objetos durante o treinamento.

- **ball.py** - Modela a bola do jogo, incluindo sua posição e velocidade.
- **field.py** - Define os limites e características do campo de jogo.
- **frame.py** - Representa um frame de estado do jogo, armazenando informações sobre a posição dos robôs e da bola.
- **robot.py** - Modela os robôs, incluindo seus estados internos e capacidades de movimentação.

C. Módulo de Ambientes de Treinamento (*envs/*)

O módulo *envs* contém a definição dos ambientes de treinamento disponíveis no **VSS-Env**. Ele permite a criação de novos cenários, facilitando a experimentação com diferentes abordagens de RL e aumentando gradualmente a dificuldade do ambiente.

- **striker.py** - Implementação de um ambiente focado no treinamento de um atacante, ensinando-o a navegar pelo campo com objetivo de ir na bola e fazer gols, não possuindo nenhum obstáculo dentro de campo.
- **strikerV1.py** - Continuação do ambiente citado acima, porém com posições da bola em lugares mais difíceis, como no canto do campo.
- **strikerMA.py** - Ambiente multi-agente possuindo dois robos adversários competindo para fazer gol, utilizando o conceito de *self-play*.
- **team.py** - Ambiente também multi-agente contendo 3 robôs cooperando para fazerem gol, contabilizando uma recompensa conjunta.

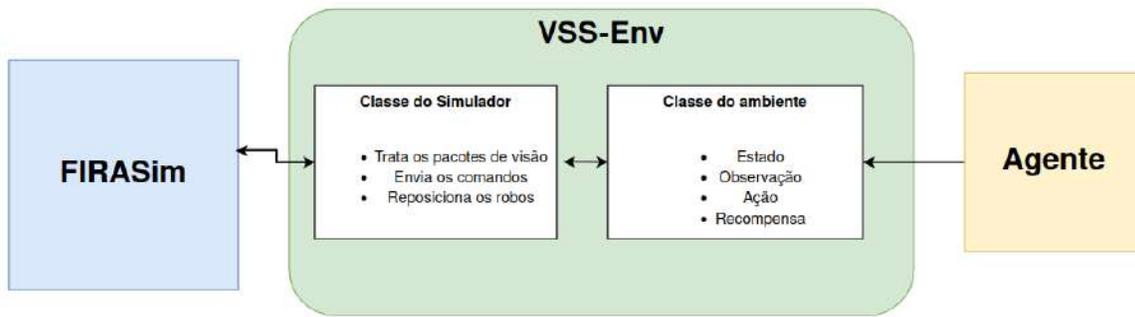


Fig. 3. Diagrama de blocos contendo fluxo das informações entre os sistemas.

D. Módulo de Ruídos e Perturbações (*noise/*)

O módulo *noise* adiciona ruídos aos robôs não controlados pelo agente, para simular imperfeições e incertezas presentes no mundo real. Isso melhora a robustez dos algoritmos de RL treinados no **VSS-Env**.

- **OUNoise.py** - Implementação do ruído *Ornstein-Uhlenbeck*, utilizado para estabilizar o aprendizado em algoritmos de RL contínuo.

E. Módulo de Comunicação Estruturada (*proto/*)

Para garantir eficiência e organização na troca de informações entre o **VSS-Env** e o **FIRASim**, o framework utiliza **Protocol Buffers (Protobuf)**. Esse módulo contém definições estruturadas dos pacotes de dados trocados entre os sistemas.

- **command.proto** - Define comandos enviados ao FIRASim para controle dos robôs.
- **common.proto** - Contém definições comuns utilizadas na comunicação entre os módulos.
- **packet.proto** - Especifica o formato dos pacotes de dados trocados durante a simulação.
- **replacement.proto** - Define a estrutura de mensagens para reposicionamento de objetos no campo.

F. Módulo de Testes (*tests/*)

Para garantir a estabilidade e integridade do framework, o **VSS-Env** conta com um conjunto de testes automatizados. O uso de testes unitários permite validar o comportamento dos módulos e prevenir regressões em futuras atualizações.

G. Configuração e Documentação

Além dos módulos de código, o **VSS-Env** inclui arquivos essenciais para instalação e documentação:

- **setup.py** - Script para configuração e instalação do framework.
- **requirements.txt** - Lista de dependências do projeto.
- **README.md** - Documentação do framework, incluindo instruções de uso e contribuição.
- **LICENSE.md** - Arquivo contendo os termos de licenciamento do software.

H. Considerações Finais

A estrutura modular do **VSS-Env** permite que pesquisadores e desenvolvedores personalizem e expandam o framework de acordo com suas necessidades. A separação clara dos módulos

facilita a manutenção do código, enquanto a integração com **FIRASim** e **Protobuf** garante eficiência e flexibilidade na simulação e treinamento de agentes de RL.

A modularidade do **VSS-Env** permite a criação e personalização de novos cenários, facilitando a experimentação com diferentes técnicas de RL. A separação dos módulos garante que cada componente tenha uma responsabilidade clara, favorecendo reuso de código, facilidade de manutenção e escalabilidade do projeto, assim mostrado na figura 3.

IV. CONCLUSÃO

O **VSS-Env** representa um avanço significativo na aplicação de Reinforcement Learning (RL) ao futebol de robôs da categoria IEEE VSSS, proporcionando um ambiente modular, extensível e acessível para a experimentação e desenvolvimento de novas estratégias de controle. Sua integração com o **FIRASim** permite simulações realistas, facilitando o treinamento e validação de agentes inteligentes em um cenário dinâmico e desafiador.

Além de fornecer uma estrutura bem definida para o desenvolvimento de single-agent e multi-agent RL, o **VSS-Env** introduz recursos como a customização de cenários, a comunicação eficiente via Protocol Buffers e a incorporação de ruídos estocásticos para tornar o aprendizado mais robusto. Essas características tornam o framework uma ferramenta valiosa para a pesquisa acadêmica e a inovação na área de robótica autônoma.

Como trabalhos futuros, espera-se:

- Expandir o suporte para uma variedade maior de algoritmos de RL, incluindo abordagens baseadas em Aprendizado por Imitação e Hierarchical Reinforcement Learning.
- Aprimorar a interface de monitoramento e análise, adicionando ferramentas de visualização para avaliar o desempenho dos agentes em tempo real.
- Otimizar a eficiência da comunicação entre o **VSS-Env** e o **FIRASim**, permitindo simulações em larga escala e treinamento distribuído.
- Desenvolver benchmarks padronizados para facilitar a comparação de diferentes abordagens dentro do **VSS-Env**.
- Integrar o framework a plataformas de computação em nuvem, viabilizando experimentos de alto desempenho para a comunidade de pesquisa.
- Expansão em ambientes cada vez mais dinâmicos e desafiadores, para single-agent e multi-agent.

Com essas melhorias, o VSS-Env continuará evoluindo como uma plataforma robusta para estudos em Reinforcement Learning e robótica autônoma, incentivando a adoção de técnicas mais avançadas na categoria IEEE VSSS e contribuindo para o avanço da inteligência artificial no futebol de robôs.

REFERÊNCIAS

- [1] Richard S Sutton, Andrew G Barto et al. *Reinforcement learning: An introduction*. Vol. 1. 1. MIT press Cambridge, 1998.
- [2] Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver, Alex Graves, Ioannis Antonoglou, Daan Wierstra e Martin Riedmiller. “Playing atari with deep reinforcement learning”. Em: *arXiv preprint arXiv:1312.5602* (2013).
- [3] David Silver, Julian Schrittwieser, Karen Simonyan, Ioannis Antonoglou, Aja Huang, Arthur Guez, Thomas Hubert, Lucas Baker, Matthew Lai, Adrian Bolton et al. “Mastering the game of go without human knowledge”. Em: *nature* 550.7676 (2017), pp. 354–359.
- [4] Oriol Vinyals, Igor Babuschkin, Junyoung Chung, Michael Mathieu, Max Jaderberg, Wojciech M Czarnecki, Andrew Dudzik, Aja Huang, Petko Georgiev, Richard Powell et al. “Alphastar: Mastering the real-time strategy game starcraft ii”. Em: *DeepMind blog* 2 (2019), p. 20.
- [5] Christopher Berner, Greg Brockman, Brooke Chan, Vicki Cheung, Przemysław Debiak, Christy Dennison, David Farhi, Quirin Fischer, Shariq Hashme, Chris Hesse et al. “Dota 2 with large scale deep reinforcement learning”. Em: *arXiv preprint arXiv:1912.06680* (2019).
- [6] OpenAI: Marcin Andrychowicz, Bowen Baker, Maciek Chociej, Rafal Jozefowicz, Bob McGrew, Jakub Pachocki, Arthur Petron, Matthias Plappert, Glenn Powell, Alex Ray et al. “Learning dexterous in-hand manipulation”. Em: *The International Journal of Robotics Research* 39.1 (2020), pp. 3–20.
- [7] Paul Christiano, Zain Shah, Igor Mordatch, Jonas Schneider, Trevor Blackwell, Joshua Tobin, Pieter Abbeel e Wojciech Zaremba. “Transfer from simulation to real world through learning deep inverse dynamics model”. Em: *arXiv preprint arXiv:1610.03518* (2016).
- [8] Sergey Levine, Chelsea Finn, Trevor Darrell e Pieter Abbeel. “End-to-end training of deep visuomotor policies”. Em: *Journal of Machine Learning Research* 17.39 (2016), pp. 1–40.
- [9] Valiollah Monajjemi, A. Koochakzadeh e S. S. Ghidary. “grSim - RoboCup Small Size Robot Soccer Simulator”. Em: *RoboCup*. 2011.
- [10] Siqi Liu, Guy Lever, Josh Merel, Saran Tunyasuvunakool, Nicolas Heess e Thore Graepel. “Emergent coordination through competition”. Em: *arXiv preprint arXiv:1902.07151* (2019).
- [11] Hiroaki Kitano, Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi, Itsuki Noda e Eiichi Osawa. “Robocup: The robot world cup initiative”. Em: *Proceedings of the first international conference on Autonomous agents*. 1997, pp. 340–347.
- [12] Karol Kurach, Anton Raichuk, Piotr Stańczyk, Michał Zajac, Olivier Bachem, Lasse Espeholt, Carlos Riquelme, Damien Vincent, Marcin Michalski, Olivier Bousquet et al. “Google research football: A novel reinforcement learning environment”. Em: *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. Vol. 34. 04. 2020, pp. 4501–4510.

AUTORES

Davi Rosim é graduando em Engenharia de Software pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e membro da equipe de robótica Robotbulls, onde desenvolve algoritmos de controle, visão computacional e tomada de decisão baseados em inteligência artificial para a categoria IEEE Very Small Size Soccer (VSSS). Além disso, participa de pesquisas acadêmicas em visão computacional e inteligência artificial, aplicadas à detecção e rastreamento de veículos.



Felipe A. P. de Figueiredo recebeu os títulos de Bacharel e Mestre em Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), Minas Gerais, Brasil, em 2004 e 2011, respectivamente. Obteve seu doutorado pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil, em 2019. Trabalha com Pesquisa e Desenvolvimento de sistemas de telecomunicações há mais de quinze anos. Seus interesses de pesquisa incluem processamento de sinais digitais, comunicações digitais, comunicações móveis, MIMO, modulações multicarrier, desenvolvimento em FPGA e aprendizado de máquina.



OFDM Signal Optimization with Genetic Algorithms for PAPR Reduction

Matheus Rangel de Lima, Daniely Gomes Silva, and Luciano Leonel Mendes

National Institute of Telecommunications - Inatel

Santa Rita do Sapucaí, MG - Brazil

Email: matheus.rangel@ges.inatel.br, daniely@inatel.br, lucianol@inatel.br

Abstract—Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is extensively employed in wireless communication systems due to its high data rates and robustness against frequency selective fading. Nevertheless, OFDM systems are challenged by a significant drawback: a high peak-to-average power ratio (PAPR) in the transmitted signal. This paper demonstrates that a real-valued genetic algorithm (RVGA) effectively reduces the PAPR of an OFDM signal. By optimizing the signal constellation and adjusting the phase and amplitude of the subcarriers, genetic algorithms (GAs) can significantly lower the PAPR while preserving both signal quality and spectral efficiency.

Index Terms—OFDM, communication systems, PAPR, GAs, RVGA, AI.

I. INTRODUCTION

The orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) scheme is a widely used technique for high-bit-rate wireless communication applications [1], with its popularity largely driven by recent advancements in digital signal processing technology. Additionally, genetic algorithms (GAs) have recently emerged as a robust tool for optimizing complex problems in various fields, including artificial intelligence (AI) and signal processing. By simulating the natural selection and evolution process, GAs can efficiently search through a large solution space to find the optimal solutions. International standards that utilize OFDM for high-speed wireless communications have been established or are in the process of being established by various committees, including IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 802.20, and European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Broadcast Radio Access Network (BRAN), as discussed in [2].

It is commonly used in wireless local area networks, digital video, and audio broadcasting systems, as well as in next-generation wireless mobile communication. However, a major drawback of OFDM systems is the high peak-to-average power ratio (PAPR), which can lead to high out-of-band radiation when signals are amplified by a radio frequency power amplifier [2].

Numerous sub-optimal methods for PAPR reduction in OFDM systems have been discussed in the literature [3], [4]. GAs have attracted considerable attention as a solution for PAPR issues, thanks to recent advancements in hardware design [5], [6]. The GA is a robust optimization technique with proven potential for practical implementation. The iterative nature of the GA-based approach offers an effective balance

between PAPR reduction performance and computational complexity. This makes it a promising solution for mitigating the high PAPR commonly encountered in OFDM systems.

The structure of this paper is organized as follows: Section II introduces the OFDM system and formulates the partial transmit sequence (PTS) PAPR reduction issue as a combinatorial optimization problem within a multidimensional real space. Section III elaborates on the real-valued genetic algorithm (RVGA) method, incorporating an extinction and immigration strategy to address this problem. Section IV presents simulation results and a detailed discussion. Finally, Section V draws conclusions based on the findings presented.

II. PRINCIPLES OF AN OFDM SYSTEM

OFDM is an essential technology in modern wireless telecommunications networks, including Wi-Fi and mobile networks such as long-term evolution (LTE) and fifth generation (5G). The principle behind OFDM is to divide a high-speed data stream into multiple lower-speed streams, which are then transmitted simultaneously over different frequencies. This technique helps mitigate the effects of multipath propagation, such as interference and signal degradation, by using multiple orthogonal subcarriers. This orthogonality ensures that subcarriers can overlap in the frequency domain without causing inter-carrier interference (ICI). As a result, OFDM can achieve high spectral efficiency by packing more data into the same bandwidth. Studies have shown that techniques like OFDM - subcarrier power modulation (OFDM-SPM) can further enhance spectral efficiency by utilizing the power of subcarriers to convey additional information bits [7].

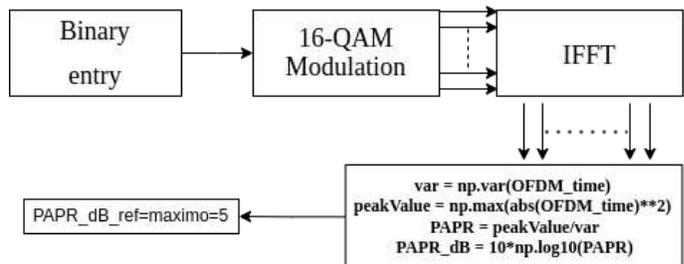


Fig. 1. Generation of OFDM signals.

The process of OFDM signal generation begins with the binary input, which is then modulated using 16-quadrature

amplitude modulation (QAM). These modulated symbols are grouped and transformed from the frequency domain to the time domain using the inverse fast Fourier transform (IFFT), generating the OFDM symbol defined by:

$$S_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(\omega_n t) + q_n \sin(\omega_n t)] \quad (1)$$

In the context where i_n and q_n respectively represent the real and imaginary parts of the symbol used in the constellation, and ω_n denotes the angular frequency of the n -th subcarrier, the OFDM symbol can be understood as a truncated Fourier series with N elements. The coefficients of this series correspond to the information being transmitted. It is essential to note that the subcarrier frequencies are chosen so that the subcarriers are orthogonal to each other, meaning that crosstalk between the sub-channels is eliminated and inter-carrier guard bands are not required. This greatly simplifies the design of both the transmitter and the receiver; unlike conventional frequency division multiplexing (FDM), a separate filter for each sub-channel is not required, and the frequency difference between any two adjacent subcarriers must be specified by:

$$\Delta f = R_{OFDM} \quad (2)$$

in which

$$R_{OFDM} = \frac{R_s}{N} \quad (3)$$

in which R_s represents the total symbol rate. The bandwidth of each subcarrier is given by:

$$BW_{ofdm} = \frac{BW_s}{N}, \quad (4)$$

with BW_s being the bandwidth of a single-carrier system. If the value of N is sufficiently large in a way that it causes BW to be smaller than the channel coherence bandwidth, this will make the subcarrier experience flat fading in its frequency. This directly implies that this technique is robust against frequency-selective channels. Although one of the primary challenges observed in OFDM systems is the high PAPR. An OFDM signal results from the summation of N random variables that weigh sinusoidal and co-sinusoidal functions. This sum can lead to instantaneous power peaks much higher than the average signal power. The relationship between the maximum power of a signal, $x(t)$, and its average power is defined as PAPR and is given by:

$$PAPR[x(t)] = \frac{\max(|x(t)|^2)}{E[|x(t)|^2]}, \quad (5)$$

where the term $E[.]$ represents the expected value of $[.]$. In OFDM systems, power peaks can drive power amplifiers into saturation, resulting in signal clipping. These distortions introduce interference within the signal bandwidth, leading to ICI, which in turn increases the bit error rate (BER). To mitigate signal clipping, high PAPR signals necessitate power amplifiers with significant back-off, at the cost of

reduced energy efficiency and increased cost. An efficient alternative is to employ PAPR reduction techniques, which aim to minimize the occurrence of peaks that drive the amplifier into saturation. The mathematical expressions in the diagram calculate the PAPR of the OFDM signal. The variance of the OFDM signal in the time domain is calculated, followed by finding the peak value of the squared magnitude of the signal. The PAPR is determined by dividing the peak value by the variance and then converting it to decibels (dB) for easier interpretation. Managing PAPR is crucial as high PAPR can lead to inefficiencies and distortions in power amplifiers, making it essential to minimize it for efficient and reliable communication.

III. PAPR REDUCTION (CLASSICS TECHNIQUES)

Various approaches have been suggested to address the PAPR issue throughout various researches, there are several approaches researchers can take, each suited to different situations. While these techniques effectively reduce PAPR, they often come with drawbacks such as increased transmit signal power, elevated BER, loss of data rates, heightened computational complexity, and other trade-offs. Among the referenced techniques includes amplitude clipping [8], clipping and filtering [5], coding [6], [9], tone reservation (TR) [10], tone injection (TI) [10], active constellation extension (ACE) [11], as well as multiple signal representation techniques like PTS [12] [13], selected mapping (SLM) [13] [14], and interleaving [7] [15], the techniques with the best performance are detailed below.

A. Partial Transmit Sequence (PTS)

PTS is a technique that involves partitioning an input data block into orthogonal sub-blocks, PTS works by dividing the data symbols into several sub-blocks, and transmitting each sub-block using a different orthogonal sequence.

In order to generate the transmit sequences the scheme computes the values of the inverse discrete Fourier transform (IDFT) with weighted phase factors, the result then it is used to generate the transmit sequences, and the IDFT converts the frequency-domain data symbols into time-domain sequences. These sequences are then transmitted over the channel.

Therefore by optimizing the phase rotations, PTS can effectively reduce the PAPR of the overall OFDM signal, which is a key benefit of PTS schemes, this process can reduce the PAPR of the overall signal, making it more suitable for transmission over wireless channels.

B. Selective Mapping (SLM)

The SLM method involves generating several versions of the same OFDM symbol from the same data vector, the candidate signals are generated by multiplying the OFDM signal with randomly generated phase shift numbers that are stored in the phase rotation matrix, which consists of diagonal elements with said values [16], each with a different phase distribution [17]. Then the version with the lowest PAPR is selected for transmission. This approach does not require any side

information (SI) to be transmitted, making it more spectrally efficient compared to other PAPR reduction techniques. This is achieved by multiplying the data vector by different pseudo-random sequences, creating different phase distributions [17]. However, the SLM method has its drawbacks.

The SLM technique can significantly reduce the PAPR, improving the performance over frequency-selective channels and increasing the robustness against ICI [17]. However, it does introduce some complexity in the transmitter, particularly in the implementation of multiple IFFT within the OFDM symbol duration. [17] Different approaches have been proposed to address the computational complexity of SLM, such as using reduced-complexity schemes, blind SLM schemes, and manipulation techniques of the IFFT process. The process of generating and selecting the best OFDM symbol can be computationally intensive, leading to increased complexity and latency. Additionally, the PAPR reduction achieved by SLM is often not significant enough to meet the requirements of certain applications [18].

All of this makes SLM a promising technique for PAPR reduction in OFDM systems. It's a simple and effective method that doesn't require any changes in the receiver structure. However, the complexity introduced in the transmitter and the need for error-protected sequence information are factors to consider in its implementation. This leads to a high computational complexity, which could be a potential drawback in systems with strict computational constraints.

C. Tone Reservation (TR)

Tone Reservation (TR) is a well-established technique used in OFDM systems. The main idea behind TR is to reserve a certain number of subcarriers, which are not used for data transmission, but instead, are used to transmit known signals. These reserved tones can be utilized in different ways to reduce the PAPR of the OFDM system. One approach is the use of the Selective Mapping (SLM) technique on the reserved tones. In this method, several versions of the same data are transmitted on the non-reserved tones, while different signals are transmitted on the reserved tones. The version with the lowest PAPR is then selected for further processing. This approach provides a significant PAPR reduction but at the cost of increased computational complexity and a slight decrease in data rate. Another approach is the use of Tone Injection (TI) on the reserved tones. In this method, a known signal is added to the data-carrying tones, and the resulting signal is then transmitted. At the receiver end, the known signal is subtracted from the received signal, resulting in a reduction in the PAPR. This approach is less complex than SLM but may not provide as much PAPR reduction. A third approach is the use of Tone Insertion (TIns) on the reserved tones. In this method, a known signal is inserted into the data-carrying tones, and the resulting signal is then transmitted. At the receiver end, the known signal is extracted from the received signal, resulting in a reduction in the PAPR. This approach is similar in complexity to TI but may provide more PAPR reduction. The use of TR for PAPR reduction is based on the principle

of signal reshaping. By carefully designing the signal on the reserved tones, the overall signal can be shaped in such a way that its peak power is reduced, thereby reducing the PAPR. This is similar to the concept of clipping, where the signal is clipped to reduce its peak power, but without the associated distortion. The effectiveness of TR schemes depends on the number of reserved tones, the specific TR scheme being used, and the characteristics of the data being transmitted. Therefore, the design of TR schemes for PAPR reduction requires careful consideration, not being so adaptable. The main drawback of this technique is that it reduces the number of subcarriers available for data transmission, which can lead to a reduction in data rate. Therefore, the number of reserved tones needs to be carefully chosen to balance the trade-off between PAPR reduction and data rate.

IV. AI APPLIED TO OFDM SYSTEMS

The application of artificial intelligence for PAPR reduction in OFDM signals is significant, owing to the iterative nature of this approach, which serves as an effective technique for enhancing signal processing while maintaining the computational cost manageable. Neural Networks and Genetic Algorithms are commonly used in conjunction in this context. In the field of OFDM signal processing, optimizing the high PAPR is a crucial aspect that can increase system efficiency. In recent years, the integration of artificial intelligence (AI) into wireless communication networks has amassed significant attention, particularly in the context of OFDM systems. AI techniques, such as deep learning, have been employed to enhance various aspects of OFDM, including channel estimation and signal detection. The efficacy of a deep neural network-based channel state estimator for OFDM systems, which significantly outperformed traditional estimation methods in noisy and interfering environments [16]. This advancement underscores the potential of AI to improve the robustness and efficiency of wireless communication networks. AI-aided OFDM receivers have shown promising results in real-world applications, which utilize a flexible architecture to adapt to real-time channel conditions [18]. Their experimental results indicated that the AI-aided receiver, particularly the SwitchNet receiver, exhibited superior performance in over-the-air tests compared to traditional OFDM receivers. This adaptability is crucial for maintaining high-quality communication in dynamic and unpredictable wireless environments, highlighting the practical benefits of integrating AI into OFDM systems. Furthermore, the application of AI in OFDM systems extends to improving bit error rate (BER) performance. An AI layer for turbo-coded OFDM systems, not only enhances BER performance but also reduces communication delays through intelligent network specification selection [17]. These findings illustrate the multifaceted advantages of AI in optimizing OFDM-based wireless communication networks, paving the way for more reliable and efficient communication systems in the future. The continuous development and integration of AI technologies are expected to drive further innovations in

this field, ultimately leading to more advanced and resilient wireless communication infrastructures.

A. Genetic Algorithm

The use of Genetic Algorithms (GA) has become an important technique in the literature for resolving optimization problems in OFDM systems. GA is a type of evolutionary algorithm that uses crossovers, mutations, selection, and other techniques to optimize a function defined in a space of dimension D [1]. This algorithm has many advantages, including good convergence, small computing time, and high robustness [1]. GA is based on concepts derived from genetics and natural evolution, and it can be used to select the optimal phase vector to reduce the PAPR in OFDM signals [1]. In addition to reducing PAPR, GA can decrease the computational load of the Phase-Weighted Technique (PWT) by searching a small piece of a set of possibilities instead of the whole set as in classical techniques [1]. A comparison study was presented in the chapter which focused on resolving an optimization problem in an OFDM system using GA. The results showed that GA is an important evolutionary algorithm with promising results for optimizing OFDM signals [1]. The application of GA in OFDM systems has shown significant promise in addressing the PAPR challenge. Genetic algorithms, known for their optimization capabilities, have been effectively utilized to enhance PAPR performance in OFDM networks. An adaptive genetic algorithm (AGA) could reduce PAPR by approximately 3.87 dB compared to traditional OFDM systems. Additionally, the integration of genetic algorithms with selected mapping (SLM) techniques has been explored to further enhance PAPR reduction. A genetic algorithm-based SLM technique that optimizes phase rotation factors to achieve significant PAPR reduction [14] demonstrated a substantial improvement in PAPR performance while reducing the computational complexity associated with traditional SLM techniques. These advancements underscore the potential of genetic algorithms to revolutionize PAPR management in OFDM systems, paving the way for more efficient and robust wireless communication networks.

V. COMPUTATIONAL COMPLEXITY

Genetic algorithms iteratively evolve a population of candidate solutions to find optimal or near-optimal solutions for complex problems, the presented graph below provides insights into the convergence behavior of two GA strategies: “WithMemory” and “PTS”. The y-axis represents the PMF, which quantifies the probability distribution of outcomes at different iterations, the x-axis corresponds to the number of iterations (or generations) during the GA execution. Two strategies are studied “WithMemory”: Maintains consistent PMF values across all iterations, while “PTS” exhibits a singular peak at iteration 4. The first strategy assigns probabilities with certainty, it suggests a more deterministic approach, where outcomes are either certain or impossible. The stability of PMF values implies predictable computational complexity. However, it may lack adaptability. “PTS” conversely shows a

more Adaptive Behavior adapting dynamically to the context. The peak at iteration 4 indicates a significant change in probabilities this adaptive behavior of the approach introduces variability, potentially addressing complex problem landscapes requiring more computational resources. The complexity of a

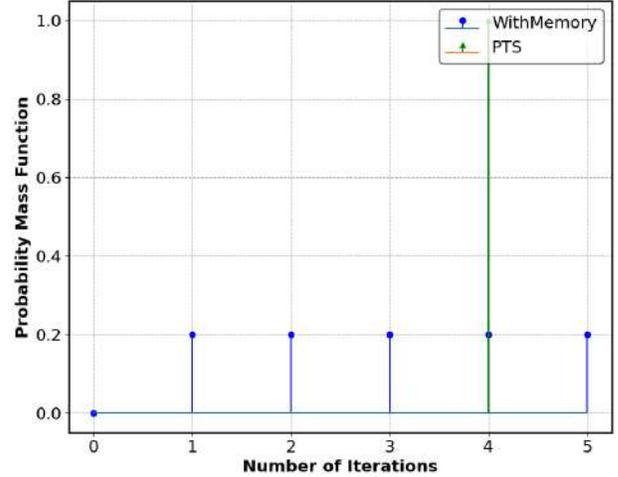


Fig. 2. Complexity of the Genetic Algorithm resulted signal PAPR.

problem in the context of genetic algorithms (GA) is closely tied to how efficiently we can represent its essential features as the problem size increases. As problems scale up, understanding how the representation complexity evolves becomes crucial. In order to investigate how the chosen representation influences search space exploration, convergence speed, and solution quality. It’s needed to experiment using different problem sizes. Such representation sizes will directly impact algorithm performance. As problem instances evolve, dynamic representations can adjust to changing requirements, data science techniques can learn optimal representations from given data, achieving adaptation to specific problem distributions is crucial for a sustainable complexity for such systems. Steeper PMF ascent suggests efficient convergence, while gradual increases indicate more intricate search spaces. The binary-like behavior observed here (certainty vs. adaptability) warrants further investigation for hybrid approaches combining deterministic and adaptive strategies, which requires further algorithm optimizations in order to achieve lower computational costs. In summary, understanding the interplay between certainty and adaptability informs complexity considerations. Researchers can leverage these findings to enhance GA performance across more diverse signal optimization domains.

VI. RESULTS

The graph below presents the behavior of the developed genetic algorithm (GA) through its Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) of Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) in which the x-axis represents the PAPR in decibels (dB), while the y-axis shows the Complementary

Cumulative Distribution Function (CCDF) that is scaled logarithmically. Each line represents the performance improvement in terms of PAPR reduction as the GA progresses through successive generations. As generations advance, there is a general shift towards lower PAPR values. The genetic algo-

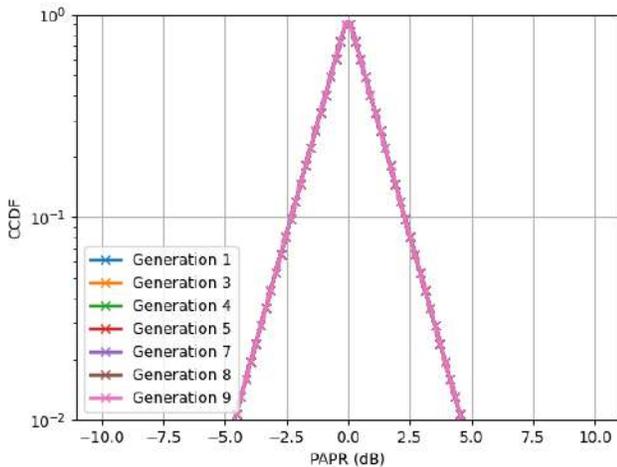


Fig. 3. Evolution of the resulted signal PAPR.

gorithm's performance in reducing PAPR is evident from the convergence of the CCDF curves towards lower PAPR values with each generation. This result aligns with findings from other studies since genetic algorithms could efficiently search for nearly optimal peak reduction tone sets, thereby achieving significant PAPR reductions [15]. The graph indicates that the genetic algorithm achieves substantial PAPR reduction with relatively lower computational overhead, making it a more practical solution for real-world applications. The consistent improvement in PAPR reduction across generations, as shown in the graph, underscores the robustness and adaptability of genetic algorithms. This adaptability is particularly beneficial in dynamic communication environments where signal conditions can vary rapidly. By comparing these results with other scientific studies, it is evident that the genetic algorithm provided a balanced approach to achieving significant PAPR reduction with manageable computational complexity. This makes them a valuable tool for improving the efficiency and reliability of modern communication systems.

VII. CONCLUSION

The GA's ability to constantly reduce the PAPR values demonstrates its efficacy towards more practical applications. The GA's iterative improvement process aligned with its evolutionary nature, provides an adjustable and flexible solution that evolves aligned with the problem's growth, resulting in a well-rounded adaptive solution. The computational cost and complexity of this approach in software development doesn't post an obstacle to its application in the field, while achieving a stable product that can hold its perform with the bigger load stress found in bigger networks can be a

challenge, the adaptive nature of the solution gives it a longer life when applied in camp, with minimum maintenance. The signal generated by the algorithm demonstrates significant potential for the future of wireless transmissions. As the demand for additional access points with higher transmission rates continues to increase over the long term, the genetic algorithm (GA)-based approach presents a promising solution through hybridization with other meta-heuristic algorithms. This hybridization entails combining various methodologies to partition the search space into broader and fine-tuning scopes for two or more distinct algorithms, including the genetic algorithm. Additionally, the integration of classical optimization techniques can result in a more tailored approach, applying the most suitable optimization for the specific signal in question. This long-term perspective highlights the flexibility and adaptability of GA systems in the short term, as well as their resilience in a continuously evolving industry over the long term. Consequently, GA systems emerge as the optimal choice for constructing more reliable networks. This research aims to contribute to the development of efficient and dependable communication systems for future wireless networks.

REFERENCES

- [1] R. W. Chang, "Synthesis of band-limited orthogonal signals for multi-channel data transmission," *Bell system technical journal*, vol. 45, no. 10, pp. 1775–1796, 1966.
- [2] S. H. Han and J. H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," *IEEE wireless communications*, vol. 12, no. 2, pp. 56–65, 2005.
- [3] L. J. Cimini and N. R. Sollenberger, "Peak-to-average power ratio reduction of an ofdm signal using partial transmit sequences," *IEEE Communications letters*, vol. 4, no. 3, pp. 86–88, 2000.
- [4] Y. Wang, W. Chen, and C. Tellambura, "A papr reduction method based on artificial bee colony algorithm for ofdm signals," *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 9, no. 10, pp. 2994–2999, 2010.
- [5] P.-Y. Chen, R.-D. Chen, Y.-P. Chang, L.-S. Shieh, and H. A. Malki, "Hardware implementation for a genetic algorithm," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 4, pp. 699–705, 2008.
- [6] P. R. Fernando, S. Katkooi, D. Keymeulen, R. Zebulum, and A. Stoica, "Customizable fpga ip core implementation of a general-purpose genetic algorithm engine," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 14, no. 1, pp. 133–149, 2009.
- [7] J. M. Hamamreh, A. Hajar, and M. Abewa, "Orthogonal frequency division multiplexing with subcarrier power modulation for doubling the spectral efficiency of 6g and beyond networks," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, no. 4, p. e3921, 2020.
- [8] J.-H. Wen, S.-H. Lee, Y.-F. Huang, and H.-L. Hung, "A suboptimal pts algorithm based on particle swarm optimization technique for papr reduction in ofdm systems," *EURASIP Journal on wireless communications and networking*, vol. 2008, pp. 1–8, 2008.
- [9] J. Tellado, "Peak to average power reduction for multicarrier modulation," *Stanford University, Ph. D. dissertation*, 2000.
- [10] B. S. Krongold and D. L. Jones, "Par reduction in ofdm via active constellation extension," *IEEE Transactions on broadcasting*, vol. 49, no. 3, pp. 258–268, 2003.
- [11] S. H. Muller and J. B. Huber, "A comparison of peak power reduction schemes for ofdm," in *GLOBECOM 97. IEEE Global Telecommunications Conference. Conference Record*, vol. 1. IEEE, 1997, pp. 1–5.
- [12] H. Breiling, S. H. Muller-Weinfurter, and J. B. Huber, "Slm peak-power reduction without explicit side information," *IEEE Communications letters*, vol. 5, no. 6, pp. 239–241, 2001.
- [13] E. A. Hagra, S. F. Desouky, S. Aldosary, H. Khaled, and T. M. Hassan, "Time reduction for slm ofdm papr based on adaptive genetic algorithm in 5g iot networks," *Sensors*, vol. 23, no. 23, p. 9310, 2023.

- [14] A. et al., "a new slm technique based on genetic algorithms for papr reduction in ofdm.," *Not Found*, pp. xxx-xxx, 2018.
- [15] Y. Wang, W. Chen, and C. Tellambura, "Genetic algorithm based nearly optimal peak reduction tone set selection for adaptive amplitude clipping papr reduction," *IEEE transactions on broadcasting*, vol. 58, no. 3, pp. 462-471, 2012.
- [16] H. et al., "deep neural network-based channel state estimator for ofdm systems.," *Not Found*, pp. xxx-xxx, 2023.
- [17] P. Subramaniam and R. D. Raut, "Ai-enabled turbo-coded ofdm system for improved ber performance," *The Journal of Supercomputing*, vol. 76, no. 6, pp. 4338-4348, 2020.
- [18] P. Jiang, T. Wang, B. Han, X. Gao, J. Zhang, C.-K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Ai-aided online adaptive ofdm receiver: Design and experimental results," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 11, pp. 7655-7668, 2021.

Assistente Virtual para Ansiedade: AVA

Rayana Fernanda dos Santos Silva, Thalline Roberto Biggi, Mariana Helena Cunha Bochi, Wanderson E. Saldanha
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
rayana.fernanda@geb.inatel.br, thalline.roberto@geb.inatel.br, mariana.h@geb.inatel.br, wsaldanha@inatel.br

Abstract—This article presents an innovative project focused on the development of a mobile application designed to address anxiety and promote mental well-being. The app will integrate advanced technologies, including Artificial Intelligence (AI) and 3D printing, to provide a holistic and data-driven approach to managing anxiety. By utilizing AI, the app will analyze complex patterns of user behavior, physiological responses, and emotional indicators to detect early signs of anxiety crises.

A key technological component of this project is the implementation of NeuroCalm AI, an advanced machine learning model designed to recognize subtle variations in user responses, voice tone, heart rate, and daily activity. This AI system will process these inputs through real-time data analytics, enabling early detection and intervention. Additionally, the app will feature personalized recommendations, guided breathing exercises, and cognitive behavioral therapy (CBT) techniques, ensuring an adaptive and user-centric experience.

The inclusion of 3D printing technology will allow users to create custom-designed tactile objects that serve as grounding tools during moments of heightened anxiety. This multisensory approach aims to enhance the effectiveness of digital therapeutic strategies by providing a tangible means of self-regulation.

By leveraging AI-driven insights and integrating physiological and behavioral data, this project seeks to revolutionize anxiety management through a proactive, personalized, and technology-driven solution. The study explores the potential of NeuroCalm AI in improving mental health interventions, fostering well-being, and setting new standards in digital therapeutics.

Index Terms—Anxiety, Mobile App, Artificial Intelligence, Mental Health, Early Detection, Wellness, NeuroCalm AI, Digital Therapeutics.

Index Terms—Anxiety, Mobile App, Artificial Intelligence, Mental Health, Early Detection, Wellness.

Resumo—Este artigo apresenta um projeto inovador voltado para o desenvolvimento de um aplicativo móvel destinado a abordar a ansiedade e promover o bem-estar mental. O aplicativo integrará tecnologias avançadas, como Inteligência Artificial (IA) e impressão 3D, para fornecer uma abordagem holística e baseada em dados para o gerenciamento da ansiedade. Utilizando IA, o aplicativo analisará padrões complexos de comportamento do usuário, respostas fisiológicas e indicadores emocionais para detectar sinais precoces de crises de ansiedade.

Um dos principais componentes tecnológicos deste projeto é a implementação do NeuroCalm AI, um modelo avançado de aprendizado de máquina projetado para reconhecer variações sutis nas respostas do usuário, tom de voz, frequência cardíaca e atividade diária. Esse sistema de IA processará esses dados por meio de análise em tempo real, permitindo a detecção precoce e a intervenção eficaz. Além disso, o aplicativo oferecerá recomendações personalizadas, exercícios de respiração guiada e técnicas de terapia cognitivo-comportamental (TCC), garantindo uma experiência adaptativa e centrada no usuário.

A inclusão da tecnologia de impressão 3D permitirá que os usuários criem objetos táteis personalizados que servem como ferramentas de ancoragem durante momentos de ansiedade elevada. Essa abordagem multissensorial visa aprimorar a eficácia

das estratégias terapêuticas digitais, fornecendo um meio tangível de autorregulação.

Ao alavancar insights baseados em IA e integrar dados fisiológicos e comportamentais, este projeto busca revolucionar o gerenciamento da ansiedade por meio de uma solução proativa, personalizada e tecnologicamente avançada. O estudo explora o potencial do NeuroCalm AI na melhoria das intervenções em saúde mental, na promoção do bem-estar e no estabelecimento de novos padrões para terapias digitais.

Palavras chave—Ansiedade, Aplicativo Móvel, Inteligência Artificial, Saúde Mental, Detecção Precoce, Bem-estar, NeuroCalm AI, Terapias Digitais.

I. INTRODUÇÃO

A ansiedade, reconhecida como uma das condições mentais mais prevalentes e impactantes da atualidade, tem sido objeto de estudos aprofundados em diversas áreas da ciência. De acordo com JONES [1], a ansiedade se manifesta de forma multifacetada, abrangendo desde preocupações persistentes e irracionais até sintomas físicos debilitantes, como taquicardia, sudorese e dificuldades respiratórias. Esses sintomas podem comprometer significativamente a qualidade de vida do indivíduo, interferindo em sua produtividade, relações interpessoais e bem-estar geral.

Estudos recentes, como os realizados por KESSLER [2], evidenciam a crescente incidência da ansiedade na população global, destacando fatores como o estilo de vida acelerado, a hiperconectividade digital e as pressões sociais como catalisadores desse transtorno. A pandemia de COVID-19 intensificou essa problemática, aumentando os níveis de estresse e incerteza e, conseqüentemente, levando a um aumento substancial nos casos de ansiedade e depressão ao redor do mundo.

A complexidade da ansiedade exige abordagens inovadoras para seu manejo e tratamento. Nesse contexto, a tecnologia tem se mostrado uma ferramenta poderosa na promoção da saúde mental. A integração de Inteligência Artificial (IA) em aplicativos móveis voltados ao bem-estar psicológico vem ganhando destaque, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real para oferecer suporte personalizado e estratégias eficazes de enfrentamento. Soluções tecnológicas modernas possibilitam a detecção precoce de padrões comportamentais associados à ansiedade, proporcionando intervenções oportunas que minimizam impactos negativos.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe o desenvolvimento de um aplicativo móvel inovador, que emprega Inteligência Artificial e impressão 3D para abordar a ansiedade de maneira holística. O objetivo é criar uma solução acessível e personalizada que não apenas auxilie no gerenciamento da ansiedade, mas também forneça insights baseados em dados

para a compreensão mais aprofundada desse transtorno. A IA desempenhará um papel fundamental na análise de dados fisiológicos e emocionais dos usuários, permitindo um suporte preventivo e terapêutico mais eficaz. Essa abordagem busca preencher lacunas nas opções terapêuticas existentes e promover uma experiência mais integrada e proativa no cuidado da saúde mental.

A seguir, serão apresentadas as bases teóricas e metodológicas que fundamentam o desenvolvimento desse aplicativo, bem como as potenciais contribuições que essa inovação pode oferecer para a área da saúde mental.

II. DESENVOLVIMENTO

A. Avaliação da Ansiedade

A ansiedade é uma condição multifacetada que se manifesta de formas variadas entre os indivíduos, tornando sua avaliação um desafio para profissionais da saúde mental. As escalas de Beck (Beck Anxiety Inventory - BAI) e Hamilton (Hamilton Anxiety Rating Scale - HAM-A) [3], amplamente utilizadas em ambientes clínicos e acadêmicos, fornecem uma avaliação da severidade da ansiedade baseada em respostas subjetivas do paciente. No entanto, estudos recentes apontam que tais instrumentos podem apresentar limitações na identificação de crises agudas de ansiedade devido à sua menor sensibilidade em detectar variações instantâneas no estado emocional e fisiológico dos indivíduos [4].

Diante dessa limitação, torna-se necessária a criação de uma escala adaptada especificamente para o monitoramento contínuo da ansiedade em tempo real, incorporando dados fisiológicos e comportamentais. A proposta deste estudo inclui o desenvolvimento de um índice de avaliação que integre biomarcadores como variações na frequência cardíaca, padrões respiratórios, condutância da pele e variações na entonação vocal, analisados por Inteligência Artificial (IA). Essa abordagem permitirá maior precisão na detecção de estados de ansiedade, possibilitando intervenções mais rápidas e eficazes dentro do aplicativo.

B. Técnicas Interativas de Controle da Ansiedade

Métodos tradicionais de controle da ansiedade, como exercícios de respiração profunda, técnicas de mindfulness e relaxamento progressivo, têm sido amplamente recomendados por especialistas devido à sua eficácia comprovada na regulação emocional. No entanto, a adesão a essas práticas pode ser desafiadora para muitos usuários devido à falta de motivação ou dificuldades em incorporar tais hábitos à rotina diária.

Para aumentar a eficácia dessas técnicas, o aplicativo propõe uma abordagem inovadora baseada na gamificação. A implementação de mecânicas de jogos, como metas diárias, feedback visual, sistema de recompensas e desafios interativos, pode elevar o engajamento dos usuários e melhorar a adoção dessas práticas ao longo do tempo [5]. O design interativo do aplicativo permitirá que os usuários acompanhem seu progresso, personalizem suas práticas e recebam sugestões de técnicas mais adequadas com base em seu estado emocional detectado pelo sistema.

Além disso, o aplicativo poderá integrar feedbacks em tempo real baseados na resposta fisiológica do usuário, utilizando sensores de dispositivos móveis para monitoramento da respiração e da frequência cardíaca. Esse recurso permitirá que o sistema recomende exercícios mais adequados ao nível de ansiedade do usuário no momento da interação.

C. Inteligência Artificial na Detecção e Gerenciamento da Ansiedade

No âmbito do nosso aplicativo, será realizado um processo de avaliação para determinar o melhor modelo de Inteligência Artificial a ser integrado. É crucial reconhecer a importância de selecionar cuidadosamente os algoritmos e métodos mais adequados para analisar os dados dos usuários e identificar sinais precoces de ansiedade de forma precisa e confiável. Serão exploradas uma variedade de abordagens, incluindo redes neurais, algoritmos de processamento de linguagem natural e técnicas de aprendizado profundo, com o objetivo de identificar a combinação mais eficaz para as necessidades específicas do nosso aplicativo. Essa abordagem permitirá garantir que o aplicativo possa oferecer intervenções personalizadas e eficientes, fornecendo um suporte significativo para o gerenciamento da ansiedade e a promoção do bem-estar emocional dos usuários. Dentre os modelos de Inteligência Artificial disponíveis, uma opção promissora para a detecção e gerenciamento da ansiedade é a utilização de redes neurais recorrentes (RNNs). As RNNs são capazes de lidar com dados sequenciais, o que é essencial para analisar padrões temporais nos dados dos usuários, como variações no humor, comportamento e linguagem que podem indicar a presença de ansiedade. Além disso, as RNNs têm a capacidade de aprender com dados históricos e adaptar suas previsões com base nas informações mais recentes, o que as torna adequadas para oferecer intervenções personalizadas e em tempo real aos usuários do aplicativo.

D. Inteligência Artificial na Detecção e Gestão da Ansiedade

A adoção de Inteligência Artificial no contexto do aplicativo desempenha um papel essencial na personalização e eficácia das intervenções. O processo de desenvolvimento envolverá a análise de diferentes modelos de IA para identificar a abordagem mais eficiente na detecção de padrões indicativos de ansiedade.

Uma das soluções promissoras para esse desafio é a utilização de Redes Neurais Recorrentes (RNNs), um tipo de modelo de aprendizado profundo especializado no processamento de dados sequenciais. As RNNs possuem a capacidade de identificar padrões temporais em dados fisiológicos e comportamentais dos usuários, como flutuações na atividade cardíaca, mudanças no tom de voz e padrões de digitação, correlacionando essas informações com estados emocionais [6].

Além das RNNs, serão exploradas técnicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN) para análise de padrões de escrita e fala dos usuários. O reconhecimento de palavras-chave e estruturas sintáticas associadas à ansiedade pode permitir a detecção precoce de crises emocionais e sugerir intervenções adequadas. Por exemplo, uma IA treinada poderá identificar

padrões discursivos indicativos de ansiedade elevada e recomendar imediatamente práticas de relaxamento ou interações com profissionais da saúde mental.

Outro modelo a ser investigado é o Transformer-based AI, como o BERT ou GPT, que podem ser utilizados para interpretar conversas em tempo real dentro do aplicativo, permitindo que a IA ofereça sugestões personalizadas e mensagens de apoio com base no contexto emocional do usuário.

Além disso, para garantir um monitoramento eficaz, o aplicativo poderá integrar sensores vestíveis (wearables), como smartwatches e pulseiras inteligentes, permitindo a coleta contínua de dados fisiológicos. A IA será responsável por analisar esses dados e gerar insights em tempo real, fornecendo recomendações automáticas para reduzir a ansiedade antes que ela evolua para uma crise.

E. Desenvolvimento de uma IA Personalizada para o Aplicativo

Diante da necessidade de um sistema altamente preciso e eficiente, foi estudado o modelo "NeuroCalm", uma Inteligência Artificial especializada na identificação e controle da ansiedade em tempo real. O "NeuroCalm" combina técnicas de aprendizado de máquina supervisionado e não supervisionado para adaptar-se ao perfil emocional de cada usuário, tornando as intervenções mais eficazes e personalizadas.

O diferencial do "NeuroCalm" é a sua capacidade de aprendizado contínuo. Com base na interação do usuário com o aplicativo, o modelo ajusta seus parâmetros para oferecer sugestões mais precisas ao longo do tempo. Além disso, o sistema poderá fornecer relatórios detalhados sobre a evolução dos níveis de ansiedade do usuário, permitindo uma compreensão mais ampla do seu bem-estar emocional e auxiliando profissionais de saúde no acompanhamento terapêutico.

III. CONCLUSÃO

A incorporação de tecnologias avançadas em um aplicativo móvel para o gerenciamento da ansiedade representa uma abordagem inovadora e promissora. Ao oferecer intervenções personalizadas e acessíveis, a plataforma pode auxiliar significativamente os usuários na regulação emocional e no enfrentamento da ansiedade, promovendo maior qualidade de vida.

Entretanto, desafios importantes precisam ser superados para garantir a eficácia do sistema. A necessidade de desenvolver uma escala específica para análise precisa da ansiedade, aliada à complexidade de interpretar sinais subjetivos e fisiológicos, exige um esforço contínuo em pesquisa e inovação. Além disso, a proteção da privacidade dos usuários e a conformidade com normas éticas são aspectos fundamentais que devem nortear o desenvolvimento e a implementação do aplicativo.

Com o compromisso de aprimoramento constante e colaboração com profissionais da saúde mental, este aplicativo tem o potencial de se tornar uma ferramenta valiosa na promoção do bem-estar emocional, oferecendo suporte confiável e eficaz para aqueles que lidam com a ansiedade no cotidiano.

REFERÊNCIAS

- [1] Fiona Jones, Jim Bright e Angela Clow. *Stress: Myth, Theory and Research*. Pearson Education, 2001.
- [2] Ronald C. Kessler, Patricia Berglund, Olga Demler, Robert Jin, Kathleen R. Merikangas e Ellen E. Walters. "Lifetime prevalence and age-of-onset distributions of DSM-IV disorders in the National Comorbidity Survey Replication". Em: *Archives of General Psychiatry* 62.6 (2005), pp. 593–602.
- [3] R. P. Snaith, S. J. Baugh, A. D. Clayden, A. Husain e M. A. Sipple. "The Clinical Anxiety Scale: An Instrument Derived from the Hamilton Anxiety Scale". Em: *The British Journal of Psychiatry* 141.5 (1982), pp. 518–523.
- [4] Mark Zimmerman, Camilo J. Ruggero, Iwona Chelminski, Diane Young, Michael A. Posternak, Michael Friedman, Daniela Boerescu e Naureen Attiullah. "Developing Brief Scales for Use in Clinical Practice: The Reliability and Validity of Single-Item Self-Report Measures of Depression Symptom Severity, Psychosocial Impairment Due to Depression, and Quality of Life". Em: *Journal of Clinical Psychiatry* 67.10 (2006), pp. 1536–1541.
- [5] Daniel Johnson, Sebastian Deterding, Kerri-Ann Kuhn, Aleksandra Staneva, Stoyan Stoyanov e Leanne Hides. "Gamification for Health and Wellbeing: A Systematic Review of the Literature". Em: *Internet Interventions* 6 (2016), pp. 89–106.
- [6] P. Lima, E. Guerra, P. Meirelles, L. Kanashiro, H. Silva e F. Silveira. "A Metrics Suite for Code Annotation Assessment". Em: *Journal of Systems and Software* 137 (2018), pp. 163–183.

Criação de casos de teste a partir de critérios de aceitação

Samuel Sousa Teles, Rosana Celine Pinheiro Damaceno, Laís Carvalho Coutinho,
Igor Ramsés Temóteo dos Santos, Rubens Abraão da Silva Sousa, Alex Lacerda Ramos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

samuel.teles@darmlabs.ifce.edu.br, rosana.damaceno@darmlabs.ifce.edu.br, lais.coutinho@darmlabs.ifce.edu.br,
igor.ramses@darmlabs.ifce.edu.br, rubens.silva@darmlabs.ifce.edu.br, alex.lacerda@ifce.edu.br

Abstract—Currently, the use of acceptance criteria in requirements has as one of its objectives the agility, detail and clarity that serve as a basis for creating test cases. This study seeks to understand the impact of acceptance criteria on the process of creating test cases in a PD&I environment applied to the development of an integrated mapping system for software life cycle artifacts. To this end, an empirical approach was adopted, using a Likert scale evaluating five dimensions: D1: Clarity and Completeness of Acceptance Criteria; D2: Relevance of Criteria to Functionality; D3: Ease of Creating Test Cases; D4: Communication and Alignment between Teams; D5: Test Coverage / Test Quality, applied to the requirements and testing teams. The results show that there is a correlation between effective team communication and improved definition of test criteria and coverage. It can be seen that continuous interaction and well-detailed criteria favor efficiency in the creation of assertive test cases.

Index Terms—Acceptance Criteria, Test Cases, Agile Methods and R&D&I Projects

Resumo—Atualmente, o uso de critérios de aceitação em requisitos tem como um de seus objetivos a agilidade, detalhamento e clareza que servem como base para criação de casos de teste. Desta forma, esse estudo busca compreender o impacto dos critérios de aceitação no processo de criação de casos de testes em um ambiente de PD&I aplicado ao desenvolvimento de um sistema de mapeamento integrado de artefatos do ciclo de vida de software. Para isso, foi adotada uma abordagem empírica, utilizando a escala de Likert avaliando cinco dimensões: D1: Clareza e Completude dos Critérios de Aceitação; D2: Relevância dos Critérios para a Funcionalidade; D3: Facilidade de Criação dos Casos de Teste; D4: Comunicação e Alinhamento entre as Equipes; D5: Cobertura de Teste / Qualidade dos Testes, aplicado às equipes de requisitos e testes. Os resultados mostram que existe correlação entre a comunicação eficaz das equipes e a melhora na definição dos critérios e abrangência dos testes. Constata-se que a interação contínua e critérios bem detalhados favorecem a eficiência na criação dos casos de testes de forma assertiva.

Palavras chave—Critérios de aceitação, Casos de teste, Métodos ágeis e Projetos de PD&I

I. INTRODUÇÃO

No contexto de desenvolvimento de software, que envolve tarefas interligadas, como a criação de requisitos e Casos de Teste (CTs), sendo ambas essenciais para garantir a qualidade final do produto. Os critérios de aceitação têm um papel central nesse processo pois servem como base para a criação de casos de teste que verifica se as funções atendem às necessidades dos usuários.

A dificuldade em definir critérios de aceite, pode tornar a criação de CTs um processo impreciso que afeta o escopo e

a exatidão, gerando assim discussões sobre como transformá-los em testes de qualidade. [1] mostra que uma descrição clara dos critérios de aceitação pode melhorar a qualidade dos testes, diminuindo riscos e retrabalho durante o ciclo de desenvolvimento ágil.

É cada vez mais claro que a qualidade dos critérios de aceitação deve nortear a geração de testes no software. Conforme [2], uma definição exata desses critérios não só diminui os riscos que podem aparecer durante o processo de desenvolvimento, mas também ajuda a melhorar a cobertura dos testes e eficiência dos procedimentos de validação. Podendo garantir um processo ágil, constante e confiável para o ciclo de desenvolvimento.

Segundo [3], o uso de métodos ágeis em lugares de inovação pode gerar conflitos com formas tradicionais de avaliação, pedindo uma nova análise das medidas e processos para ter um equilíbrio entre mudança e controle. Ao contrário do desenvolvimento convencional, projetos de PD&I muitas vezes têm altos níveis de incertezas, novas tecnologias e necessidades que mudam, tornando a escolha de critérios um desafio ainda maior.

Este trabalho busca compreender e analisar o impacto dos critérios de aceitação durante o processo de cobertura, análise e criação dos casos de testes em um contexto de desenvolvimento de um software de mapeamento integrado de artefatos do ciclo de desenvolvimento de software. Contribuindo na perspectiva de como os critérios de aceitação impactam o desenvolvimento dos casos de testes.

O estudo apresenta-se nas seguintes seções: Introdução: apresentou-se o contexto e o objetivo deste trabalho; Trabalhos Relacionados: apresenta estudos prévios destacando contribuições, avanços e lacunas que contextualizam a importância e relevância do trabalho; Método: relata o passo-a-passo utilizado para a construção da pesquisa; Resultados e Discussões: apresenta os dados obtidos e suas implicações; Conclusão: resume as contribuições do trabalho, aponta limitações e sugere trabalhos futuros.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

[4] demonstram que a participação ativa do cliente durante o desenvolvimento assegura que os testes de aceitação do usuário (UAT) aumentam a cobertura de cenários de um produto. Essa abordagem enfatiza a importância da integração dos critérios de aceite nas fases de testes para que proporcione um processo eficaz para a criação dos casos de teste. Entretanto, a relação

entre os critérios de aceite e o processo de desenvolvimento dos casos de teste e sua influência não são reportados, não permitindo uma visão ampla da estratégia adotada.

Por outro lado, [5] aborda que a gestão de requisitos de qualidade (QRs) é um aspecto fundamental no desenvolvimento de software, especialmente no desenvolvimento ágil e rápido. No entanto, a entrega acelerada de funcionalidades leva à negligência desses requisitos, tornando-os difíceis de testar. O estudo destaca essa limitação, mas não explora como mitigar o problema, apesar de trazer estratégias, práticas e diretrizes para um bom gerenciamento de QRs. Neste contexto, os critérios de aceite podem assegurar que os QRs sejam explicitamente definidos e verificados nos testes.

Nesse sentido, a relação entre histórias de usuário, critérios de aceite e requisitos de qualidade dentro de metodologias ágeis é investigada por [6]. Para isso, a padronização da escrita e estruturação dos artefatos contribuem para a clareza na especificação de requisitos e foram explorados, de modo que sua cobertura fosse ampla o suficiente para garantir a entrega dos resultados esperados. No entanto, mesmo reconhecendo a importância de definir critérios de aceite precisos para a garantia da cobertura dos requisitos formulados, o estudo não investigou de que forma eles podem impactar no processo de criação dos casos de teste.

A necessidade de definir critérios de aceite para que assegurem que os testes atendam às expectativas do produto e aos requisitos essenciais é discutida por [7], que examina os critérios de cobertura de teste no contexto de Linhas de Produto de Software (SPLT). Dessa maneira, o estudo destaca a importância de uma cobertura abrangente, ressaltando que os critérios de teste utilizados em SPLT devem ser mais bem definidos para refletir as especificidades dos domínios. Contudo, não se investiga como os critérios de aceite podem garantir a cobertura dos testes e orientar sua criação, tampouco se contemplam cenários relevantes nas implicações analisadas.

Para garantir plenamente esses QRs, é essencial investigar como esses critérios influenciam na qualidade dos casos de testes, considerando fatores que impactam na construção, eficácia e abrangência [8]. Embora reconheça-se que a falta de clareza nos requisitos possa prejudicar a elaboração de testes e impactar a qualidade, é crucial analisar se esses critérios contemplam e abrangem os cenários necessários e garantem a cobertura adequada no processo de criação dos testes.

Ademais, requisitos bem definidos facilitam a extração sistemática de cenários, sendo essencial a forma como os requisitos são representados para a criação de testes [9]. Mesmo que haja abordagens e técnicas para essa elaboração, não há uma validação concreta de que os testes derivados cobrem todos os cenários descritos, além de uma avaliação de quais critérios específicos, como os critérios de aceite, impactam na geração e exploração dos casos de teste.

A compreensão da influência de diferentes requisitos na formulação dos testes permanece um desafio. A clareza desses critérios é crucial para a elaboração de processos de validação, a fim de garantir uma cobertura adequada dos cenários [10]. Porém, uma análise aprofundada da influência sobre como requisitos distintos, como critérios de aceite, impactam diretamente na definição inicial dos testes ainda é pouco explorada.

Requisitos bem definidos, como os critérios de aceite, têm uma influência direta na qualidade da validação de software, impactando tanto a cobertura quanto a qualidade do produto final [11]. A falta de clareza e a inconsistência nos requisitos, frequentemente resultantes de alterações abruptas dificultam a criação de casos de teste eficazes [12]. Para assegurar a qualidade e eficácia da validação do software, é essencial investigar o processo de criação de casos de teste a partir de requisitos claros e estáveis, que serão discutidos no presente trabalho.

Em suma, é possível observar lacunas na relação e no impacto de critérios de aceite na criação e no desenvolvimento dos casos de testes, no nível de cobertura de cenários e garantia obtida por meio deles, além da sua relação com os QRs e validação da influência de seus requisitos, ao assegurar suas definições e verificações. Diante das limitações encontradas, nota-se a necessidade de explorar o processo de criação e validação dos casos de teste a partir de critérios de aceite, seus impactos e sua relação com o desenvolvimento e a qualidade dos testes, o qual é o tema central deste trabalho.

III. MÉTODO

O estudo consiste em uma pesquisa Quantitativa, realizada no Laboratório de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PD&I) do Instituto Federal do Ceará. A aplicação ocorreu através da atuação dos participantes no desenvolvimento de um software de integração de artefatos de software de forma integrada. Os participantes do estudo foram os membros dos times de requisitos (5 participantes) e testes (6 participantes) totalizando 11 participantes.

Dado o objetivo do estudo, que é compreender como os critérios de aceitação influenciam na formulação e criação de casos de teste, os times foram envolvidos diretamente no processo. O formulário aplicado consiste em 5 dimensões de foco, sendo elas: D1) Clareza e Coesão dos Critérios de Aceitação. D2) Relevância dos Critérios para a funcionalidade, D3) Facilidade de Criação dos Casos de Teste, D4) Comunicação e Alinhamento entre as Equipes e D5) Cobertura de Teste com tipo de escala de Likert de 5 pontos, sendo elas: 1 – Discordo totalmente, 2 – Discordo, 3 – Não concordo e nem discordo, 4 – Concordo e 5 – Concordo totalmente. O questionário utilizado consiste em 20 perguntas, disponível no Zenodo conforme [link](#) elaboradas com base na literatura e nas cinco dimensões escolhidas.

O processo de desenvolvimento consistiu em 1) Elicitação do requisito; 2) Desenvolvimento dos artefatos; 3) Validação com o P.O; 4) Reunião de explicação do requisito; 5) Criação dos casos de teste; e 6) Validação dos cenários dado o entendimento do requisito. Para isso, a aplicação foi realizada com os dois times sempre após a conclusão das 6 etapas para compreender os desafios a cada requisito entregue para o time de teste.

A análise dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva, utilizando a distribuição de frequência e utilização da correlação de Spearman para analisar a relação entre os critérios e as dimensões. Considerando que o formulário utilizou uma escala do tipo Likert, o uso da correlação de Spearman é necessário para verificar dados em variáveis não paramétricas. Os dados são apresentados entre coeficientes entre -1 e 1, que

respectivamente demonstram associação inversa e associação direta, quanto mais próximo de 0 indicando ausência de correlação. Neste trabalho, os resultados são apresentados por meio de tabelas.

Os participantes aceitaram participar da pesquisa através da concordância por meio eletrônico do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) de forma espontânea, permitindo o uso dos dados para finalidade de pesquisa, tendo os dados de identificação anonimizados durante todo o processo.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos e discute, com base na literatura, as implicações e evidências empíricas encontradas no desenvolvimento de um sistema de integração de artefatos de software em um laboratório de PD&I. São apresentadas análises descritivas com o auxílio da Tabela 1, demonstrando a distribuição por frequência das respostas e tabelas que analisam os dados utilizando a correlação de Spearman.

Tabela 1. Distribuição da frequência de respostas do questionário					
Critérios	Discordo totalmente	Discordo	Não concordo e nem discordo	Concordo	Concordo totalmente
D1 - Clareza e Completude dos Critérios de Aceitação					
D1.1	-	-	-	4 (36,36%)	7 (63,64%)
D1.2	-	-	1 (9,09%)	7 (63,64%)	3 (27,27%)
D1.3	-	-	2 (18,18%)	4 (36,36%)	5 (45,45%)
D1.4	-	-	4 (36,36%)	4 (36,36%)	3 (27,27%)
D2 - Relevância dos Critérios para a Funcionalidade					
D2.1	-	-	-	7 (63,64%)	4 (36,36%)
D2.2	-	-	1 (9,09%)	6 (54,54%)	4 (36,36%)
D2.3	-	-	-	6 (54,54%)	5 (45,45%)
D2.4	-	-	2 (18,18%)	5 (45,45%)	4 (36,36%)
D3 - Facilidade de Criação dos Casos de Teste					
D3.1	-	-	4 (36,36%)	1 (9,09%)	6 (54,54%)
D3.2	-	-	3 (27,27%)	5 (45,45%)	3 (27,27%)
D3.3	3 (27,27%)	3 (27,27%)	4 (36,36%)	-	1 (9,09%)
D4 - Comunicação e Alinhamento entre as Equipes					
D4.1	-	-	4 (36,36%)	1 (9,09%)	6 (54,54%)
D4.2	-	-	4 (36,36%)	1 (9,09%)	6 (54,54%)
D4.3	-	-	2 (18,18%)	6 (54,54%)	3 (27,27%)
D4.4	-	-	2 (18,18%)	5 (45,45%)	4 (36,36%)
D4.5	-	-	5 (45,45%)	2 (18,18%)	4 (36,36%)
D5 - Cobertura de Teste / Qualidade dos Testes					
D5.1	-	-	7 (63,64%)	2 (18,18%)	2 (18,18%)
D5.2	-	1 (9,09%)	3 (27,27%)	2 (18,18%)	5 (45,45%)
D5.3	-	-	2 (18,18%)	3 (27,27%)	6 (54,54%)
D5.4	-	-	1 (9,09%)	1 (9,09%)	9 (81,81%)

Diante dos resultados obtidos e da execução da análise dos dados utilizando a correlação de Spearman, observam-se padrões relevantes nas relações entre as variáveis analisadas. A Tabela 2 apresenta a comparação entre as dimensões: Clareza e Completude dos Critérios de Aceitação e Comunicação e Alinhamento entre as Equipes, assim exibindo as associações mais significativas.

Tabela 2: Clareza e Completude dos Critérios de Aceitação X Comunicação e Alinhamento entre as Equipes									
	D1.1	D1.2	D1.3	D1.4	D4.1	D4.2	D4.3	D4.4	D4.5
D1.1	-								
D1.2	0.561	-							
D1.3	0.290	0.380	-						
D1.4	0.127	0.457	0.351	-					
D4.1	-0.034	0.329	0.652*	0.294	-				
D4.2	-0.034	0.329	0.652*	0.402	0.929***	-			
D4.3	-0.165	0.466	0.333	0.538	0.696*	0.696*	-		
D4.4	-0.032	0.190	-0.198	0.052	0.236	0.236	0.556	-	
D4.5	-0.097	0.207	0.365	0.138	0.676*	0.773**	0.773**	0.579	-

Nota: * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

De acordo com a Tabela 2, há uma correlação forte entre os itens D4.1 e D4.2 da dimensão D4 (Comunicação e Alinhamento entre Equipes) com o item D1.3 da dimensão D1 (Clareza e Completude dos Critérios de Aceitação), evidenciando que a comunicação entre as equipes se reflete em critérios de aceitação mais completos, impactando a qualidade e clareza do critério de aceite.

Além disso, existem pontos de correlação forte entre itens da mesma dimensão D4 (Comunicação e Alinhamento entre equipes), como mostra a ligação entre os itens D4.1 e D4.2, ressaltando que as comunicações não devem ser apenas contínuas, mas também objetivas e eficientes. Ademais, a correlação entre os itens D4.3 e D4.5 mostra que a troca de feedbacks entre os times se reflete positivamente no ajuste e refinamento dos critérios de aceitação. A Tabela 3 apresenta a comparação entre as dimensões: Relevância dos Critérios para a Funcionalidade e Facilidade de Criação dos Casos de Teste, exibindo assim as associações mais significativas.

Tabela 3: Relevância dos Critérios para a Funcionalidade X Facilidade de Criação dos Casos de Teste							
	D2.1	D2.2	D2.3	D2.4	D3.1	D3.2	D3.3
D2.1	-						
D2.2	0.603*	-					
D2.3	0.828***	0.486	-				
D2.4	0.322	0.696*	0.249	-			
D3.1	0.670*	0.369	0.809**	0.294	-		
D3.2	0.512	0.371	0.494	0.294	0.786**	-	
D3.3	-0.592	-0.253	-0.633*	-0.179	-0.378	-0.162	-

Nota: * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

De acordo com a Tabela 3, destaca-se uma forte correlação positiva entre o item D3.1 da dimensão D3 (Facilidade de Criação dos Casos de Teste) e o item D2.3 da dimensão D2 (Relevância dos Critérios para a Funcionalidade), mostrando que o critério de aceitação bem definido e necessário para a funcionalidade influencia fortemente na criação de casos de teste de forma rápida e ampla. Por outro lado, há uma forte correlação negativa entre os itens D3.3 e D2.3, indicando que, quando os critérios de aceitação não são claros e necessários para a funcionalidade, existe dificuldade na criação dos casos

de teste. [13] apresenta que a ambiguidade de exigência nos requisitos se relaciona com o sucesso de projetos de software.

Ademais, há uma forte correlação positiva entre os itens da mesma dimensão D2.1 e D2.3, mostrando que, quando os critérios de aceitação contemplam as necessidades mais importantes para o usuário final, tendem a incluir todos os aspectos necessários para o funcionamento correto da funcionalidade. Assim, reforçando a importância de alinhar os critérios de aceitação de acordo com a perspectiva do usuário final. [14] apresenta-se que a metodologia ágil melhora a satisfação do cliente no desenvolvimento de software ao priorizar os usuários finais em todo o processo, em comparação com as metodologias de sistemas tradicionais.

Além disso, é apresentada outra correlação forte positiva entre itens da mesma dimensão, neste momento entre os itens D3.1 e D3.2, assim indicando que a qualidade dos critérios de aceitação desempenha um papel fundamental na eficiência e agilidade do processo de criação dos casos de teste. Conforme destacado por [15], a definição clara e precisa dos critérios de aceitação é essencial para a eficiência do desenvolvimento ágil, facilitando a elaboração de casos de teste e aprimorando a interação entre as equipes. A Tabela 4 apresenta a comparação entre as dimensões: Relevância dos Critérios para a Funcionalidade e Cobertura de Teste / Qualidade dos Testes, assim exibindo as associações mais significativas.

	Testes							
	D2.1	D2.2	D2.3	D2.4	D5.1	D5.2	D5.3	D5.4
D2.1	-							
D2.2	0.603*	-						
D2.3	0.828**	0.466	-					
D2.4	0.322	0.696*	0.249	-				
D5.1	0.662*	0.647*	0.505	0.314	-			
D5.2	0.540	0.249	0.705*	0.336	0.082	-		
D5.3	0.363	0.389	0.064	0.515	0.644*	0.144	-	
D5.4	-0.089	0.249	0.000	0.466	0.346	0.043	0.552	-

Nota: * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

De acordo com a Tabela 4, há uma correlação forte entre os itens D2.1 e D2.2 da dimensão D2 (Relevância dos Critérios para a Funcionalidade e Comunicação) e o item D5.1 da dimensão D5 (Cobertura de Teste / Qualidade dos Testes), indicando que, quando os critérios de aceitação abordam de forma clara os aspectos importantes para o cliente e estão alinhados com os requisitos e necessidades do usuário final, isso permite a identificação de casos de teste com cenários complexos. [16] destaca que os critérios de aceitação auxiliam a equipe de testes a identificar condições de sucesso.

Ademais, é apresentada uma correlação entre os itens D5.2 e D2.3, indicando que, quando os critérios de aceitação são considerados necessários para o correto funcionamento da funcionalidade, facilita o processo de criação de casos de testes abrangentes que contemplem todos esses critérios de aceitação, evitando lacunas nos testes. Destaca-se que a integração eficaz dos critérios de aceitação na prática ágil contribui para a validação contínua da aplicação, assim aumentando o ali-

nhamento com as expectativas do usuário final. A Tabela 5 apresenta a comparação entre as dimensões: Comunicação e Alinhamento entre as Equipes e Cobertura de Teste / Qualidade dos Testes, assim exibindo as associações mais significativas.

	D4.1	D4.2	D4.3	D4.4	D4.5	D5.1	D5.2	D5.3	D5.4
D4.1	-								
D4.2	0.929**	-							
D4.3	0.696*	0.696*	-						
D4.4	0.236	0.236	0.556	-					
D4.5	0.676*	0.773**	0.773**	0.579	-				
D5.1	-0.131	-0.131	0.240	0.134	0.063	-			
D5.2	0.471	0.633*	0.606*	0.190	0.576	0.082	-		
D5.3	-0.194	0.003	0.353	0.344	0.407	0.644*	0.144	-	
D5.4	-0.098	0.129	0.082	0.160	0.007	0.346	0.043	0.552	-

Nota: * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

De acordo com a Tabela 5, há uma correlação forte entre os itens D4.2 e D4.3 da dimensão D4 (Comunicação e Alinhamento entre as Equipes) e o item D5.2 da dimensão D5 (Cobertura de Teste/Qualidade dos Testes), indicando que, quando as interações entre os times são objetivas e eficientes na resolução de dúvidas e/ou divergências sobre os critérios de aceitação, e há um alinhamento constante para o refinamento e ajuste dos critérios de aceitação, ocasiona o aumento da probabilidade de todos os critérios de aceitação serem contemplados nos casos de teste. Este resultado é reforçado por [17], que analisa as necessidades de informação das equipes para melhorar a comunicação dos requisitos, destacando que uma comunicação eficaz entre as equipes contribui para um melhor entendimento dos critérios de aceitação, resultando em maior qualidade na cobertura dos testes.

Outro ponto a ser destacado é a forte correlação entre itens da mesma dimensão, como demonstrado pela ligação entre os itens D5.1 e D5.3. Essa relação indica que, quando os critérios de aceitação permitem a criação de cenários complexos, facilita a elaboração de casos de teste mais detalhados que possam abranger falhas e bugs no software. [18] demonstra que os testes são eficazes a partir do momento em que se tem uma visão compreensível e profunda do que o usuário final deseja.

V. CONCLUSÃO

Compreender o processo de criação de casos de teste a partir dos critérios de aceitação, em um contexto de laboratório de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PD&I) colaborando para a interligação e interação entre as equipes, alinhando-se às exigências do contexto real de PD&I e impactando diretamente a qualidade dos testes de software. Através dos resultados, nota-se que limitações foram consideradas, como o número reduzido na amostra/participantes e em um público mais diverso que esteja inserido no mesmo contexto com experiências diferentes, mas que atue na área de requisitos e testes.

Através desse estudo, é visível que a clareza e a completude dos critérios de aceitação são significativamente influenciadas por uma comunicação eficaz entre as equipes, reforçando que interações contínuas e objetivas impactam positivamente a

definição dos critérios de aceite. Ademais, constata-se que critérios bem definidos e alinhados às necessidades do usuário final favorecem a criação de casos de teste abrangentes, eficientes e que contemplam cenários básicos e complexos.

Por meio de investigação empírica conduzida, a relação entre critérios de aceitação e qualidade dos testes oferece percepções valiosas para a melhoria do desenvolvimento ágil de software e nas interações entre equipes de requisitos e testes. Futuras pesquisas podem ser conduzidas visando à ampliação da população, incorporando diferentes senioridades, adição da visão das equipes de desenvolvimento, possibilitando a exploração de outras variáveis, como culturais, organizacionais, processuais e método de gerenciamento, que podem influenciar na construção dos critérios de aceitação e os modos de documentar os casos de testes.

AUTORES



Samuel Sousa Teles é graduando em Redes de Computadores pelo Instituto Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia de Software, com ênfase em Qualidade de Software e Detecção de Bugs, atuando principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento seguro e detecção de bugs.



Rosana Celine Pinheiro Damaceno é graduanda em Ciência da Computação pelo Instituto Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia de Software, atuando na área de Qualidade de Software.



Laís Carvalho Coutinho é graduanda em Ciência da Computação pelo Instituto Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia de Software, atuando na área de Qualidade de Software.



Igor Ramsés Temóteo dos Santos é graduando em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pelo Instituto Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia de Software, com ênfase em Qualidade de Software, Classificação e Categorização de Bugs. Atua principalmente nos seguintes temas: Classificação de bugs, Categorização de bugs e Detecção de Bugs.



Rubens Abraão da Silva Sousa possui graduação em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pelo Instituto Federal do Ceará (2025) e é mestrando em Ciência da Computação pela Universidade Estadual do Ceará. Atualmente, é líder técnico de requisitos e testes em projeto de lei de informática. Tem experiência na área de Engenharia de Software, com ênfase em Qualidade de Software, Detecção de Defeitos e Vulnerabilidades, e Inteligência Artificial. Atua principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento seguro, detecção de vulnerabilidades em APIs e predição de bugs.



Alex Lacerda Ramos atua como professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). É Doutor e Mestre em Informática Aplicada pela Universidade de Fortaleza (UNIFOR), com bolsa PROSUP-CAPES. Possui especialização em Docência pelo IFCE e pela Universidade Católica Dom Bosco (UCDB). É graduado em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pelo Instituto Federal do Piauí (IFPI). Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Desenvolvimento de Sistemas de Informação e Redes de Computadores. Suas áreas de interesse incluem Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, inteligência artificial, aprendizado de máquina e deep learning.

REFERÊNCIAS

- [1] Jannik Fischbach et al. “Automatic Creation of Acceptance Tests by Extracting Conditionals from Requirements: NLP Approach and Case Study”. Em: *arXiv* (fev. de 2022).
- [2] Everton N. Narciso, Fátima L. S. Nunes e Márcio E. Delamaro. “Seleção de Casos de Teste Utilizando Conceitos de Variabilidade: Uma Revisão Sistemática”. Em: *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI 2012)*. Sociedade Brasileira de Computação, mai. de 2012, pp. 193–203. DOI: [10.5753/sbsi.2012.14405](https://doi.org/10.5753/sbsi.2012.14405).
- [3] Robert G. Cooper e Anita Friis Sommer. “New-Product Portfolio Management with Agile”. Em: *Research-Technology Management* 63 (1 jan. de 2020), pp. 29–38. ISSN: 0895-6308. DOI: [10.1080/08956308.2020.1686291](https://doi.org/10.1080/08956308.2020.1686291).
- [4] Natarajan Sowri Raja Pillai e Ranganathan Rani Hemamalini. “Hybrid User Acceptance Test Procedure to Improve the Software Quality”. Em: *The International Arab Journal of Information Technology* 19 (6 2022). ISSN: 2309-4524. DOI: [10.34028/iajit/19/6/14](https://doi.org/10.34028/iajit/19/6/14).
- [5] Woubshet Behutiye, Pertti Karhapää, Lidia López, Xavier Burgués, Silverio Martínez-Fernández, Anna Maria Vollmer, Pilar Rodríguez, Xavier Franch e Markku Oivo. “Management of Quality Requirements in Agile and

- Rapid Software Development: A Systematic Mapping Study”. Em: *Information and Software Technology* 123 (jul. de 2020), p. 106225. ISSN: 0950-5849. DOI: [10.1016/j.infsof.2019.106225](https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.106225).
- [6] Antônio Ferreira, Alberto Rodrigues da Silva e Ana Paiva. “Towards the Art of Writing Agile Requirements with User Stories, Acceptance Criteria, and Related Constructs”. Em: *Proceedings of the 17th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering*. SCITEPRESS - Science e Technology Publications, 2022, pp. 477–484. ISBN: 978-989-758-568-5. DOI: [10.5220/0011082000003176](https://doi.org/10.5220/0011082000003176).
- [7] Jihyun Lee, Sungwon Kang e Pilsu Jung. “Test Coverage Criteria for Software Product Line Testing: Systematic Literature Review”. Em: *Information and Software Technology* 122 (jun. de 2020), p. 106272. ISSN: 0950-5849. DOI: [10.1016/j.infsof.2020.106272](https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106272).
- [8] Samera Obaid Barraood et al. “Test Case Quality Factors”. Em: *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)* 12 (3 abr. de 2021), pp. 1683–1694. ISSN: 1309-4653. DOI: [10.17762/turcomat.v12i3.990](https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i3.990).
- [9] Alessandro Rodrigues, Jéssyka Vilela e Carla Silva. “A Systematic Mapping Study on Techniques for Generating Test Cases from Requirements”. Em: *Proceedings of the 9th International Conference on Internet of Things, Big Data and Security*. SCITEPRESS - Science e Technology Publications, 2024, pp. 141–148. ISBN: 978-989-758-699-6. DOI: [10.5220/00125519000003705](https://doi.org/10.5220/00125519000003705).
- [10] Omdev Dahiya e Kamna Solanki. “Prevailing Standards in Requirement-Based Test Case Prioritization: An Overview”. Em: *Advances in Software Engineering and Testing*. Springer, 2021, pp. 467–474. DOI: [10.1007/978-981-15-8354-4_46](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8354-4_46).
- [11] Samera Obaid Barraood, Haslina Mohd e Fauziah Baharom. “An Initial Investigation of the Effect of Quality Factors on Agile Test Case Quality Through Experts’ Review”. Em: *Cogent Engineering* 9 (1 dez. de 2022). ISSN: 2331-1916. DOI: [10.1080/23311916.2022.2082121](https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2082121).
- [12] Jarbele Coutinho, Wilkerson Andrade e Patricia Machado. “A Survey of Requirements Engineering and Software Testing Practices in Agile Teams”. Em: *Proceedings of the 7th Brazilian Symposium on Systematic and Automated Software Testing*. New York, NY, USA: ACM, out. de 2022, pp. 9–18. ISBN: 978-1-4503-9753-7. DOI: [10.1145/3559744.3559746](https://doi.org/10.1145/3559744.3559746).
- [13] Erik Jan Philippo, Werner Heijstek, Bas Kruiswijk, Michel R. V. Chaudron e Daniel M. Berry. “Requirement Ambiguity Not as Important as Expected — Results of an Empirical Evaluation”. Em: *Software Engineering Research and Applications*. Springer, 2013, pp. 65–79. DOI: [10.1007/978-3-642-37422-7_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37422-7_5).
- [14] Lalband Neelu e D. Kavitha. “Software Development Technique for the Betterment of End User Satisfaction Using Agile Methodology”. Em: *TEM Journal* 9 (3 ago. de 2020), pp. 992–1002. ISSN: 2217-8333. DOI: [10.18421/TEM93-22](https://doi.org/10.18421/TEM93-22).
- [15] Balasubramaniam Ramesh, Lan Cao e Richard Baskerville. “Agile Requirements Engineering Practices and Challenges: An Empirical Study”. Em: *Information Systems Journal* 20 (5 set. de 2010), pp. 449–480. ISSN: 1350-1917. DOI: [10.1111/j.1365-2575.2007.00259.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2575.2007.00259.x).
- [16] Jemison dos Santos, Luiz Eduardo G. Martins, Valdívino A. de Santiago Júnior, Lucas Venezian Povoá e Luciana Brasil R. dos Santos. “Software Requirements Testing Approaches: A Systematic Literature Review”. Em: *Requirements Engineering* 25 (3 set. de 2020), pp. 317–337. ISSN: 0947-3602. DOI: [10.1007/s00766-019-00325-w](https://doi.org/10.1007/s00766-019-00325-w).
- [17] Anne Hess, Philipp Diebold e Norbert Seyff. “Understanding Information Needs of Agile Teams to Improve Requirements Communication”. Em: *Journal of Industrial Information Integration* 14 (jun. de 2019), pp. 3–15. ISSN: 2452-414X. DOI: [10.1016/j.jii.2018.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.04.002).
- [18] Michael Unterkalmsteiner, Tony Gorschek, Robert Feldt e Eriks Klotins. “Assessing Requirements Engineering and Software Test Alignment—Five Case Studies”. Em: *Journal of Systems and Software* 109 (nov. de 2015), pp. 62–77. ISSN: 0164-1212. DOI: [10.1016/j.jss.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.07.018).

DactiloView: Um Sistema Interativo para o Aprendizado da Língua de Sinais Boliviana por meio de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs)

Katherine Andrea Martinez Trillo
Universidad Privada del Valle - UNIVALLE
mtk0029973@est.univalle.edu

Abstract—This paper presents the development and implementation of “DactiloView”, an interactive system designed to improve the learning of Bolivian Sign Language (LSB) in deaf children, with a special focus on the Educational Unit “Audiología Lucy Argandoña de Céspedes” in Cochabamba, Bolivia. The system combines advanced technologies, such as sensorized gloves, artificial vision and a web platform with 3D animations, to offer a multisensory and inclusive learning experience. Preliminary results show that the integration of TICs in the education of the deaf community not only improves the quality of learning, but also promotes social inclusion and equal opportunities. This project represents a significant advance in the application of innovative technologies for special education in Bolivia, where the implementation of TICs in the teaching of sign language is still incipient.

Index Terms—Bolivian Sign Language, Interactive System, Multisensorial Learning, TICs in education.

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento e a implementação do “DactiloView”, um sistema interativo projetado para melhorar a aprendizagem da Língua de Sinais Boliviana (LSB) em crianças surdas, com foco especial na Unidade Educacional “Audiología Lucy Argandoña de Céspedes” em Cochabamba, Bolívia. O sistema combina tecnologias avançadas, como luvas com sensores, visão artificial e uma plataforma web com animações 3D, para oferecer uma experiência de aprendizagem multissensorial e inclusiva. Os resultados preliminares mostram que a integração de TICs na educação da comunidade surda não apenas melhora a qualidade da aprendizagem, mas também promove a inclusão social e a igualdade de oportunidades. Este projeto representa um avanço significativo na aplicação de tecnologias inovadoras para a educação especial na Bolívia, onde a implementação de TICs no ensino da língua de sinais ainda é incipiente.

Palavras chave—Aprendizagem Multissensorial, Língua de Sinais Boliviana, Sistema Interativo, TICs na educação.

I. INTRODUÇÃO

No Bolívia, a comunidade surda enfrenta desafios significativos quando se trata de acesso a uma educação de qualidade, especialmente no que diz respeito ao aprendizado da Língua de Sinais Boliviana (LSB). De acordo com o censo do Instituto Nacional de Estatística da Bolívia (2012), existem 59.454 pessoas com deficiência auditiva no país [1]. A LSB é fundamental para a comunicação e o desenvolvimento cognitivo das crianças surdas, mas a falta de recursos e de educação especializada limita seu aprendizado e integração.

Desde 2010, o Ministerio de Educación de Bolivia et al. [2] disponibilizou apenas quatro módulos de ensino da LSB, sem atualizações posteriores. Essa deficiência restringiu o acesso das crianças surdas a materiais educacionais adequados, impactando seu desenvolvimento linguístico. A situação ficou ainda mais evidente durante a pandemia de COVID-19, quando a educação virtual expôs a falta de ferramentas acessíveis para a comunidade surda [3]. A ausência de estratégias inclusivas nas políticas educacionais destacou a necessidade de implementar soluções tecnológicas para garantir uma educação acessível.

Nesse contexto, a implementação limitada de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) no ensino da LSB tem sido um fator determinante na exclusão educacional das crianças surdas. Em espaços dedicados à sua educação, como a Unidade Educacional “Audiología Lucy Argandoña de Céspedes”, os professores enfrentam dificuldades para atender às necessidades de seus alunos devido à falta de ferramentas tecnológicas especializadas. Isso evidencia a necessidade de desenvolver soluções inovadoras que integrem as TICs no ensino da LSB, permitindo melhorar a qualidade do aprendizado e promovendo uma educação mais inclusiva.

Estudos anteriores também demonstraram que a aplicação das Tecnologias da Informação no ensino da língua de sinais pode melhorar significativamente os processos de comunicação e aprendizagem em populações surdas. Hernández, Pulido e Arias (2015) destacam que essas tecnologias, quando utilizadas de forma pedagógica e acessível, permitem superar barreiras tradicionais do ensino, promovendo maior autonomia e participação dos estudantes surdos [4].

Diante desse cenário, surge o “DactiloView”, um sistema interativo projetado para melhorar o aprendizado da LSB por meio da integração de tecnologias avançadas, como luvas sensorizadas, visão computacional e uma plataforma web com animações 3D. Do ponto de vista técnico, o projeto combina sensores de flexão, giroscópios e feedback háptico para oferecer uma experiência de aprendizado multissensorial e interativa.

A justificativa social do projeto está no seu potencial para promover a inclusão e a igualdade de oportunidades, reduzindo as barreiras de comunicação enfrentadas pela comunidade surda na Bolívia [5]. Além disso, pesquisas recentes reforçam

que o uso das TICs em contextos inclusivos favorece significativamente o aprendizado e a adaptação dos estudantes com diferentes tipos de diversidade intelectual e sensorial [6]. Por outro lado, a justificativa acadêmica baseia-se na contribuição do projeto para o campo da educação especial, oferecendo uma ferramenta inovadora que pode servir como base para futuras pesquisas sobre a integração de TICs no ensino de línguas de sinais.

II. METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema interativo para o aprendizado da Língua de Sinais Boliviana (LSB) baseou-se em uma metodologia mista, combinando abordagens qualitativas e quantitativas. O componente qualitativo investigou observações sobre a interação do usuário com o sistema, enquanto o quantitativo avaliou o progresso no aprendizado da LSB. A pesquisa foi do tipo exploratória, pois examinou um problema pouco estudado, fornecendo informações valiosas para futuras investigações.

A. Pesquisa e Análise de Necessidades

Realizou-se uma pesquisa documental sobre a deficiência auditiva e a LSB, utilizando materiais do Ministério da Educação e observações na Unidade Educacional "Audiologia Lucy Argandoña de Céspedes". Identificaram-se barreiras no aprendizado da LSB, o que permitiu definir os requisitos do sistema e o conteúdo proposto, incluindo dactilologia, numerologia e vocabulário selecionado.

III. PROJETO DO SISTEMA

O sistema DactiloView foi projetado para oferecer uma experiência de aprendizado interativa e multissensorial, combinando hardware e software de forma integrada. A seguir, descrevemos em detalhes os componentes técnicos do sistema.

A. Componentes de Hardware

O hardware do DactiloView foi desenvolvido para capturar e interpretar os movimentos das mãos, fornecendo feedback háptico em tempo real. Os principais elementos são:

Luvas Sensorizadas: As luvas foram equipadas com sensores Flex, que medem a flexão dos dedos [7], e um módulo MPU6050 (acelerômetro e giroscópio), que detecta movimentos lineares e rotacionais das mãos [8], como visto na Figura 1. Cada luva contém cinco sensores flexíveis, um para cada dedo. Esses sensores variam sua resistência elétrica com base na flexão dos dedos, permitindo a detecção precisa dos movimentos das articulações. Além disso, três estados de flexão diferentes foram levados em consideração para este projeto: flexionado, semiflexionado e estendido. Dessa forma, temos um conjunto de estados para cada dedo para cada letra do alfabeto. A Tabela 1 mostra um exemplo de algumas das letras que foram utilizadas e como o nível de flexão foi estabelecido para cada uma delas.

Por outro lado, o módulo MPU6050 foi posicionado na parte superior da luva para capturar a orientação e o movimento da mão no espaço tridimensional, fornecendo dados de aceleração e rotação, essenciais para interpretar gestos complexos da LSB. Além disso, micromotores vibratórios foram incorporados na palma da luva para fornecer feedback tátil ao usuário. Em caso

TABELA I
VALORES ATRIBUÍDOS EM FLEXÃO, POSIÇÃO E MOVIMENTO PARA AS LETRAS.

Letra	A	E	I	O	U	G	J	P
Polegar	1	3	3	3	2	2	3	1
Indicador	3	2	3	3	1	1	3	1
Médio	3	3	3	3	1	3	3	2
Anelar	3	3	3	3	3	3	3	3
Mínimo	3	2	1	3	3	3	1	3
MPU6050	Vertical			Horiz.			Mov. incluído	Direção para baixo
	Estado		Descrição					
	1		Não flexionado					
	2		Semiflexionado					
3		Flexionado						

de execução incorreta de uma sinal, os motores vibram para alertar o usuário.

Microcontrolador ESP32: O ESP32 foi escolhido como o núcleo de processamento do hardware devido à sua versatilidade, conectividade Wi-Fi integrada [9]. Ele é responsável por coletar dados dos sensores Flex e do MPU6050, processar esses dados e enviá-los via Wi-Fi para a plataforma web. Além disso, o ESP32 controla os micromotores vibratórios com base na validação das sinais, garantindo que o usuário receba feedback imediato sobre a execução correta ou incorreta dos gestos.

Alimentação e Conectividade: O sistema é alimentado por uma bateria recarregável de 9V, integrada às luvas. A conectividade Wi-Fi permite a transmissão dos dados em tempo real para a plataforma web, onde são exibidos os níveis de flexão e extensão dos dedos, bem como a validação das sinais. Essa integração garante uma experiência de aprendizado contínua e interativa, sem a necessidade de cabos ou conexões físicas adicionais.

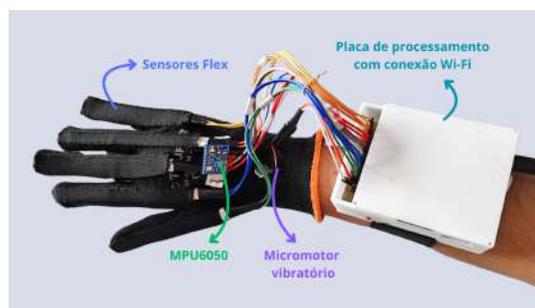


Fig. 1. Foto das luvas sensorizadas com os componentes destacados, como sensores Flex, MPU6050 e micromotores vibratórios.

B. Componentes de Software

O software do DactiloView foi projetado para ser acessível, interativo e eficiente, combinando tecnologias modernas de desenvolvimento web, animação 3D e visão computacional.

Plataforma Web: A interface do usuário foi desenvolvida utilizando HTML, CSS e JavaScript, garantindo compatibilidade com diferentes dispositivos e navegadores. A plataforma inclui animações 3D criadas no Blender, um software de modelagem e animação 3D, onde cada sinal da LSB é representada por um avatar 3D que demonstra os movimentos corretos como visto na Figura 2.



Fig. 2. Foto do site que usa luvas sensoriais.

Para aumentar o engajamento dos usuários, a plataforma incorpora elementos de gamificação, como barras flexíveis para cada dedo, para que o usuário possa encontrar o nível correto de flexão, que incentivam o aprendizado progressivo. Além disso, um banco de dados armazena o progresso de cada usuário, permitindo o acompanhamento personalizado e a adaptação do conteúdo conforme as necessidades individuais.

Visão Computacional com MediaPipe: Para oferecer uma alternativa às luvas sensorizadas, foi integrada uma funcionalidade de visão computacional utilizando a plataforma MediaPipe, desenvolvida pelo Google e você pode ver na Figura 3 a plataforma usando visão artificial. O MediaPipe utiliza algoritmos de aprendizado de máquina para rastrear os movimentos das mãos em tempo real por meio de uma câmera [10]. Essa tecnologia permite capturar gestos complexos e compará-los com os padrões armazenados no sistema, validando a execução correta das sinais. Além disso, o sistema foi aprimorado com a implementação de um modelo LSTM (Long Short-Term Memory), uma rede neural recorrente especializada no processamento de seqüências temporais, como os movimentos das mãos [11]. O uso de inteligência artificial em tempo real no ensino de línguas de sinais tem sido cada vez mais explorado na literatura. Um exemplo notável é o trabalho de Cabana (2024), que propôs um sistema baseado em visão computacional e redes neurais para auxiliar no aprendizado da Língua de Sinais Americana (ASL). O sistema desenvolvido demonstrou ser capaz de identificar e validar sinais complexos com alta precisão, oferecendo feedback imediato ao usuário. Essa abordagem se alinha diretamente com a implementação do MediaPipe e do modelo LSTM no DactiloView, evidenciando o potencial da IA como suporte educativo eficaz para comunidades surdas [12].



Fig. 3. Foto do site usando visão computacional para detectar a execução de cada sinal feito pelo usuário.

Entrenamiento da Inteligência Artificial: O treinamento de IA foi realizado usando um conjunto de dados composto de

seqüências de imagens representando cada sinal no vocabulário LSB. Para isso, foram coletadas amostras de gestos realizados por diferentes usuários, garantindo a diversidade e robustez do modelo. O processo de treinamento incluiu a aplicação de técnicas de *early stop*, que interrompem o treinamento quando o modelo para de melhorar sua precisão, evitando overfitting. Além disso, um diagrama de blocos das etapas realizadas para treinar cada modelo de inteligência artificial pode ser visto na Figura 4. O modelo LSTM foi treinado para reconhecer padrões temporais nos movimentos das mãos, permitindo uma classificação precisa do sinal. Esse processo levou um tempo considerável, mas resultou em um sistema altamente eficiente para validação de gestos.



Fig. 4. Diagrama de blocos do processo de treinamento da IA, mostrando as etapas de coleta de dados, pré-processamento, treinamento do modelo LSTM e validação.

Integração Hardware-Software: Os dados coletados pelas luvas sensorizadas são transmitidos via Wi-Fi para a plataforma web, onde são processados e exibidos em tempo real. A integração entre hardware e software permite:

- Visualização imediata dos movimentos das mãos na interface web.
- Feedback visual e háptico para correção de erros.
- Armazenamento do progresso do usuário para análise posterior.

C. Funcionamento do Sistema

O fluxo de funcionamento do DactiloView pode ser resumido em três etapas principais:

- 1) **Demonstração:** O usuário visualiza a animação 3D de uma sinal na plataforma web.
- 2) **Execução:** O usuário realiza a sinal utilizando as luvas sensorizadas ou a câmera.
- 3) **Validação:** O sistema compara o gesto realizado com o padrão armazenado e fornece feedback visual (na plataforma) e háptico (nas luvas).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Análise Quantitativa

Para avaliar o progresso das crianças na aprendizagem da Língua de Sinais Boliviana (LSB), foram realizados dois exames: um pré-teste e um pós-teste. O pré-teste focou exclusivamente no reconhecimento da datilologia (alfabeto em LSB),

uma vez que, segundo o relato da professora, os estudantes não tinham conhecimento prévio de sinais para comunicação diária. O pós-teste, por sua vez, incluiu não apenas datilologia, mas também vocabulário básico, associação de sinais e soletração de nomes, refletindo o progresso integral dos estudantes.

a.1) Comparação entre Pré-teste e Pós-teste

A Tabela II apresenta os resultados comparativos entre o pré-teste e o pós-teste na área de datilologia. Observa-se uma melhoria significativa no desempenho dos estudantes, com um aumento médio de 64,3%.

TABELA II
COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO PRÉ-TESTE E PÓS-TESTE EM DATILOLOGIA.

Estudante	Pré-teste (%)	Pós-teste (%)	Melhoria (%)
E1	16,7	93,1	76,4
E2	16,7	74,1	57,4
E3	16,7	79,3	62,6
E4	25,0	72,4	47,4
Média	18,8	79,7	64,3

a.2) Resultados do Pós-teste em Novas Áreas

A Tabela III apresenta os resultados do pós-teste nas áreas de vocabulário, associação de sinais e soletração de nomes, que não foram avaliadas no pré-teste. Os estudantes alcançaram médias de 91,5%, 87,5% e 88,1%, respectivamente, demonstrando um bom domínio dessas habilidades.

TABELA III
RESULTADOS DO PÓS-TESTE EM VOCABULÁRIO, ASSOCIAÇÃO DE SINAIS E SOLETRAÇÃO DE NOMES.

Categoria	E1	E2	E3	E4	Média
Vocabulário (%)	95,5	86,4	95,5	88,6	91,5
Associação de Sinais (%)	50,0	100,0	100,0	100,0	87,5
Soletração de Nomes (%)	100,0	83,3	88,9	80,0	88,1

B. Análise Qualitativa

Além dos resultados quantitativos, foram realizadas observações qualitativas durante a implementação do projeto. Os estudantes demonstraram um alto nível de motivação ao interagir com o sistema, especialmente com as animações 3D e o feedback tátil proporcionado pelas luvas sensorizadas. A professora da turma destacou que o sistema foi uma ferramenta valiosa para melhorar a comunicação e a aprendizagem dos estudantes, promovendo um ambiente mais inclusivo.

C. Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos demonstram que o sistema interativo DactiloView teve um impacto positivo na aprendizagem da LSB, com uma melhoria média de 64,3% na área de datilologia. Resultados similares foram encontrados em estudos internacionais, como o de Niksiar et al. (2025), que avaliaram a eficácia de ambientes virtuais autênticos desenvolvidos especificamente para alunos surdos. Nesse estudo, observou-se que a combinação de elementos visuais claros, interatividade digital e feedback imediato contribuiu significativamente para o aumento do engajamento e da compreensão dos conteúdos pelos estudantes. Esses achados reforçam a eficácia da abordagem multissensorial adotada no DactiloView, especialmente no

que diz respeito ao uso de animações 3D e à retroalimentação tátil como ferramentas de apoio à aprendizagem inclusiva [13]. No entanto, é importante discutir as limitações do projeto e sua aplicabilidade em diferentes contextos.

c.1) Limitações do Projeto

Uma das principais limitações deste estudo é o pequeno tamanho da exposição, composta por apenas quatro alunos. Embora os resultados sejam promissores, é difícil generalizá-los para uma população maior. Além disso, o período de intervenção (três semanas) pode não ser suficiente para avaliar o impacto a longo prazo do sistema LSB. Por esse motivo, pesquisas futuras devem incluir uma amostra maior e um período de intervenção mais longo para validar essas descobertas.

Outra limitação é o foco em uma única população, pois o projeto foi inicialmente direcionado a crianças surdas sem habilidades em língua de sinais. No entanto, ao longo do desenvolvimento do projeto, foi observada a ampla gama de condições que os alunos podem apresentar, incluindo surdos, não surdos, alunos com déficit de atenção e até mesmo aqueles no espectro do autismo. Isso sugere que o sistema pode ser adaptado a necessidades especiais, mas requer ajustes adicionais para maximizar sua eficácia.

c.2) Aplicabilidade em Diferentes Contextos

O DactiloView provou ser eficaz não apenas para crianças surdas, mas também para crianças ouvintes que precisam aprender LSB para se comunicar com seus colegas. Isso destaca o potencial do sistema como uma ferramenta inclusiva nas salas de aula das crianças. Além disso, o uso de tecnologias interativas, como animações 3D e feedback tátil, mostrou-se altamente motivador para os alunos. Esse aspecto é especialmente relevante para crianças com transtornos como autismo ou transtorno de déficit de atenção, que muitas vezes têm dificuldade de se adaptar aos métodos tradicionais de ensino. O sistema pode ser adaptado para atender às necessidades específicas dos alunos, explorando o potencial das TIC para criar experiências de aprendizagem mais imersivas e eficazes.

c.3) Potencial das TICs na Educação Inclusiva

O sucesso do DactiloView reforça o potencial das TIC na educação inclusiva. Ao combinar hardware acessível (luvas equipadas com sensores) com software interativo (plataforma web e visão computacional), o sistema oferece uma solução inovadora e escalável para o ensino de LSB. Essa abordagem pode ser adaptada para outras línguas de sinais ou mesmo para ensinar outras habilidades, como matemática ou leitura, ampliando seu impacto em diferentes contextos educacionais. Ele também pode ser usado com diferentes populações, como famílias de crianças surdas, que também precisam aprender a linguagem de sinais para se comunicar efetivamente dentro de suas famílias. A importância das tecnologias emergentes no desenvolvimento de ambientes educacionais mais diversos e adaptáveis também tem sido reconhecida em eventos internacionais, como o seminário realizado pela Universidade de Burgos, que abordou o potencial das TICs para atender às necessidades de uma sala de aula diversa [14].

V. CONCLUSÃO

O projeto DactiloView demonstrou ser uma ferramenta eficaz e inovadora para o ensino da Língua de Sinais Boliviana (LSB), combinando hardware acessível e software interativo para criar uma experiência de aprendizagem multissensorial. Os resultados mostraram uma melhoria média de 64,3% na datilografia e desempenhos destacados em vocabulário (91,5%), associação de sinais (87,5%) e soletração de nomes (88,1%). Esses resultados reforçam o potencial das TICs na educação inclusiva, beneficiando tanto crianças surdas quanto ouvintes.

Apesar do sucesso, o projeto apresenta limitações, como o tamanho reduzido da amostra e o curto período de intervenção. Futuras pesquisas devem ampliar a amostra e explorar adaptações para crianças com autismo ou déficit de atenção, maximizando a eficácia do sistema.

O DactiloView tem potencial para ser adaptado a outras línguas de sinais, habilidades educativas e contextos, como o ensino para famílias de crianças surdas. Em conclusão, o projeto representa um avanço significativo na aplicação de tecnologias inovadoras para a inclusão social, promovendo uma sociedade mais justa e acessível.

REFERÊNCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística. *Censo de población y vivienda 2012: Resultados oficiales*. Instituto Nacional de Estadística (INE). 2012.
- [2] Ministerio de Educación de Bolivia, Federación Boliviana de Sordos, Fundación Amazónica para el Desarrollo de los Sordos e Proyecto “Arca” de Riberalta. *Módulo 1: Curso de enseñanza de la lengua de señas boliviana*. Primera edición. La Paz, Bolivia: Ministerio de Educación, dez. de 2010.
- [3] M. Bluske Moscoso e J. Vargas Villena. “Oídos sordos a los problemas de educación para personas con discapacidad auditiva”. Em: *Verdad con Tinta* (jan. de 2021). URL: <https://verdadcontinta.com/2021/01/25/oidos-sordos-a-los-problemas-de-educacion-para-personas-con-discapacidad-auditiva/>.
- [4] Cesar Hernández, Jose L. Pulido e Jorge E. Arias. *Las tecnologías de la información en el aprendizaje de la lengua de señas*. Revista de Salud Pública, vol. 17, no. 1, pp. 61–73. 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.15446/rsap.v17n1.36935>.
- [5] S. Lanza Bugueño. “Personas sordas afrontan barreras de comunicación en instituciones”. Em: *Los Tiempos* (jan. de 2018). URL: <https://www.lostiempos.com/actualidad/cochabamba/20180122/personas-sordas-afrontan-barreras-comunicacion-instituciones>.
- [6] Rossemay Catalina Montiel Arreaga e Juan Francisco Falquez Torres. *Las TIC en la Educación Inclusiva: Herramientas para el Aprendizaje de Estudiantes con Diversidad Intelectual*. Ciencia Latina: Revista Científica Multidisciplinar. Consultado el 7 de mayo de 2025. URL: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14812.
- [7] NYU Tisch. *Sensors: The Basics*. ITP Physical Computing, NYU Tisch. 2024. URL: <https://itp.nyu.edu/physcomp/lessons/sensors-the-basics/>.
- [8] Components101. *MPU6050 Accelerometer and Gyroscope Module*. Components101. 2021. URL: <https://components101.com/sensors/mpu6050-module>.
- [9] Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Espressif Systems. Versão v3.4. 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.
- [10] Google AI for Developers. *Guía de soluciones de MediaPipe*. Google AI. Mai. de 2024. URL: <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide?hl=es-419>.
- [11] Maximilian Schneider. *Función y aplicación de la memoria a largo plazo (LSTM)*. Konfuzio. Fev. de 2025. URL: <https://konfuzio.com/es/lstm/>.
- [12] Elisa Cabana. *A Real-Time Artificial Intelligence System for Learning Sign Language*. arXiv preprint, arXiv:2404.07211 [cs.CV]. Consultado el 7 de mayo de 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.07211>.
- [13] Nasim Niksiar, İldeniz Özverir e Ali F. Meghdari. *The Effectiveness of an Authentic E-Learning Environment for Deaf Learners*. Applied Sciences, vol. 15, no. 3, art. 1568. Consultado el 7 de mayo de 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/app15031568>.
- [14] Cadena SER. *Estudian en Burgos las tecnologías emergentes como recurso para una educación en la diversidad*. Radio Castilla – Cadena SER. Consultado el 7 de mayo de 2025. Mar. de 2025. URL: <https://cadenaser.com/castillayleon/2025/03/18/estudian-en-burgos-las-tecnologias-emergentes-como-recurso-para-una-educacion-en-la-diversidad-radio-castilla/>.

AUTORES

Katherine Andrea Martinez Trillo É

formada em Engenharia Biomédica pela Universidade Privada do Valle - UNIVALLE (2024). Desde 2023, é membro ativo da Sociedade de Estudantes de Engenharia Biomédica da UNIVALLE e integra o grupo de pesquisa da universidade, participando de diversos projetos da UMA, empresa de inovação tecnológica da instituição.



Possui experiência no desenvolvimento de páginas web aplicadas à Internet das Coisas (IoT), além de atuar no processamento de sinais biomédicos. Também tem grande interesse no processamento de imagens médicas, e na implementação de protocolos para a gestão e análise de imagens no contexto clínico. Sua formação e experiência lhe permitiram desenvolver habilidades tanto na área técnica quanto na aplicação de tecnologias inovadoras para o setor da saúde.

Como parte de seu trabalho de pesquisa, ele recebeu reconhecimento em competições de inovação tecnológica. Em 2023, ela conquistou o segundo lugar no Falling Walls, realizado em La Paz, Bolívia, e em 2024 alcançou o segundo lugar no FETIN do INATEL, Brasil. Ambas as conquistas estão relacionadas ao desenvolvimento de seu projeto de pesquisa, que também faz parte de seu artigo científico em andamento.

Estudo do Sistema de Controle PID para Robôs aplicados no IEEE Very Small Size Soccer (VSSS)

Alexandre B. Lugli, Davi Rosim, Edmundo H. de P. Silva, Egídio R. Neto, Eugênio M. J. da Silva, Enzo R. R. Lemos, Guilherme M. Virgulino, João Henrique S. Delfino, Kaynan Henrique D. de Melo, Marco A. Carnevali Ribeiro, Wanderson E. Saldanha
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
baratella@inatel.br, davi.rosim@ges.inatel.br, edmundo.henrique@geb.inatel.br, egidio.neto@inatel.br, eugenio@inatel.br, enzo.rodrigues@gea.inatel.br, guilherme.virgulino@geb.inatel.br, joao.h@gec.inatel.br, kaynan.melo@gec.inatel.br, m.antonio@gea.inatel.br, wsaldanha@inatel.br

Abstract—This paper discusses the work developed by the RobotBulls team from the National Telecommunications Institute in the IEEE Very Small Size Soccer category. It focuses on the implementation of PID control to enhance the performance of robots in dynamic environments. A new approach for optimizing control parameters is presented to improve decision-making and movement precision. The aim is to share the insights and techniques gained, helping teams improve their performance or enter the category.

Index Terms—Artificial Intelligence, PID Control, Robotics, Very Small Size Soccer.

Resumo—Este artigo discute o trabalho desenvolvido pela equipe RobotBulls, do Instituto Nacional de Telecomunicações, na categoria IEEE Very Small Size Soccer. O foco é na implementação do controle PID para aprimorar o desempenho dos robôs em ambientes dinâmicos. Apresenta-se uma nova abordagem para otimizar os parâmetros de controle, visando melhorar a tomada de decisão e a precisão dos movimentos. O objetivo é compartilhar os conhecimentos adquiridos, auxiliando equipes a melhorar seu desempenho ou ingressar na categoria.

Palavras chave—Controle PID, Inteligência Artificial, Robótica, Very Small Size Soccer.

I. INTRODUÇÃO

O estudo realizado pela equipe RobotBulls, conforme apresentado na Figura 1, do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), foca no desenvolvimento e otimização do controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para aprimorar o desempenho dos robôs na competição de futebol de robôs IEEE Very Small Size Soccer (VSSS). O objetivo principal do estudo é garantir que os robôs sigam trajetórias precisas, evitem colisões e atinjam a bola de maneira eficiente, utilizando o controle PID para otimizar o comportamento dinâmico e a precisão dos movimentos.

A equipe RobotBulls teve sua primeira participação oficial na Competição Latino-Americana de Robótica (LARC) [1] em 2015, na cidade de Uberlândia/MG, marcando o início de sua trajetória nas competições de robótica. Desde então, a equipe tem se destacado no cenário nacional e internacional, alcançando resultados significativos e sendo reconhecida como vice-campeã e, posteriormente, campeã. Entre 2016 e 2019, a equipe manteve-se consistentemente no pódio, mostrando sua excelência e evolução a cada edição. Em 2020, devido à



Fig. 1. Logo da equipe RobotBulls

pandemia de COVID-19, a competição foi adaptada para o formato remoto, utilizando um simulador para as partidas entre as equipes, o que representou um desafio adicional, mas também uma oportunidade para novas experiências e aprendizado. A equipe continuou sua busca pela inovação e pelo aprimoramento das técnicas utilizadas, especialmente no controle dos robôs, sempre com o objetivo de manter a excelência em suas performances. O estudo realizado pela equipe RobotBulls é apresentado de forma estruturada nos capítulos do trabalho. O Capítulo II: Fundamentação Teórica aborda o controle PID, suas vantagens, desvantagens e aplicação em robótica. Também discute a Sintonia pelo Lugar Geométrico das Raízes (LGR), que ajusta os parâmetros do PID para otimizar a estabilidade e a resposta do sistema, essenciais para o desempenho dos robôs em competições como a IEEE Very Small Size Soccer (VSSS). No Capítulo III: Desenvolvimento, são detalhados os processos de amostragem do sistema e calibração do controle PID nos robôs da equipe, incluindo os ajustes finos dos parâmetros do controlador para otimizar o desempenho nas partidas. O Capítulo IV: Conclusão apresenta os resultados da aplicação do controle PID, destacando melhorias na estabilidade e precisão dos robôs. Também aborda a contribuição da Sintonia pelo Lugar Geométrico das Raízes (LGR), que otimizou os parâmetros do PID, aprimorando o desempenho dos robôs nas competições. O estudo avança as técnicas de controle em robótica, melhorando a resposta dinâmica dos robôs.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O controlador PID é implementado para gerenciar variáveis cruciais do jogo, como a posição, a velocidade e as trajetórias, garantindo precisão e estabilidade ao ajustar continuamente a direção e a velocidade dos robôs, tanto no software quanto no firmware. Esse controle permite corrigir desvios em tempo real, assegurando que os robôs mantenham a precisão necessária para interceptar a bola, desviar de adversários e alcançar posições estratégicas com baixo tempo de resposta e alta eficiência, mesmo diante das constantes mudanças durante as partidas.

A sintonia dos parâmetros do controlador é ajustada cuidadosamente para atender às exigências do ambiente de competição, considerando as altas velocidades e frequentes interações entre os robôs. Esses ajustes são fundamentais para garantir a estabilidade do sistema, mesmo em cenários de alta complexidade. Assim, o controle PID desempenha um papel vital no comportamento robusto e eficaz dos robôs, contribuindo diretamente para o desempenho competitivo da equipe em alto nível.

A. PID

O controle PID [2] [3] [4] é uma técnica amplamente utilizada para garantir precisão e estabilidade em sistemas de controle automático. No sistema dos robôs, seu objetivo é assegurar que o robô siga o caminho predefinido de maneira eficiente e estável. No contexto de futebol de robôs, a inteligência artificial do sistema calcula e envia diretamente os valores de RPM (rotações por minuto) necessários para cada motor, permitindo que o robô execute as manobras desejadas com precisão. Esses valores de RPM são ajustados continuamente com base nos dados de sensores e na estratégia de controle, garantindo que o robô alcance a bola de forma eficiente, siga trajetórias otimizadas e evite colisões, tudo de maneira controlada e dinâmica.

O componente proporcional é responsável por reagir diretamente ao erro atual, aplicando uma correção proporcional à sua magnitude. A constante proporcional determina o peso dessa reação, influenciando a rapidez com que o sistema tenta corrigir o erro. Valores maiores dessa constante tornam o sistema mais ágil, mas podem levar a oscilações caso sejam muito altos. Por outro lado, valores baixos podem resultar em respostas lentas e menos eficazes.

O componente integral considera o histórico do erro ao longo do tempo, acumulando-o e ajustando a saída para eliminar erros persistentes que o componente proporcional sozinho não consegue corrigir. A constante integral determina o impacto dessa acumulação no ajuste do sistema. Um valor elevado dessa constante pode corrigir rapidamente erros residuais, mas também pode introduzir oscilações e instabilidade, especialmente se houver ruídos no sinal ou mudanças frequentes no ambiente. Já valores muito baixos tornam o sistema menos sensível a erros acumulados, o que pode ser útil para evitar reações desnecessárias, mas pode deixar erros residuais sem correção.

O componente derivativo prevê tendências futuras do erro ao considerar sua taxa de variação. Ele suaviza a resposta do sistema, reduzindo oscilações e contribuindo para um movimento

mais estável. A constante derivativa ajusta a intensidade dessa ação. Um valor elevado dessa constante pode reduzir oscilações de maneira eficiente, mas também pode amplificar ruídos no sistema, causando flutuações indesejadas. Por outro lado, valores muito baixos tornam sua contribuição insignificante, deixando o sistema mais suscetível a oscilações em mudanças rápidas de erro.

A forma que essas constantes são aplicadas ao sistema está na Figura 2 [5].

No contexto dos robôs de futebol, cada uma dessas constantes desempenha um papel crucial. O ganho proporcional assegura uma resposta imediata ao erro, permitindo que o robô ajuste sua direção e velocidade com rapidez. O ganho integral corrige desvios acumulados, garantindo que o robô alcance sua trajetória alvo mesmo após mudanças de longo prazo. Já o ganho derivativo suaviza os movimentos, prevenindo oscilações bruscas e mantendo o controle mesmo em situações de alta dinâmica, como mudanças rápidas de direção e interações com outros robôs. A escolha apropriada e o ajuste fino dessas constantes são fundamentais para otimizar o desempenho do controle PID e, conseqüentemente, do sistema como um todo.

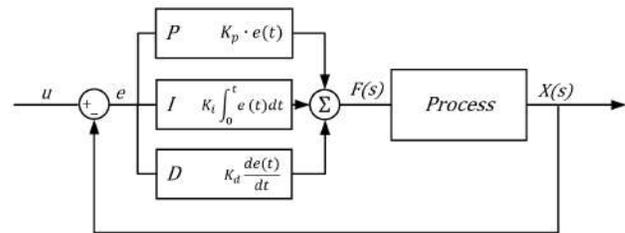


Fig. 2. Lógica do Sistema de Controle PID

B. Sintonia pelo Método do Lugar Geométrico das Raízes (LGR)

A sintonia dos controladores dos robôs foi realizada utilizando o método do Lugar Geométrico das Raízes (LGR) [2] [4], uma técnica amplamente empregada na análise e projeto de sistemas de controle. Esse método consiste em mapear graficamente as trajetórias dos polos do sistema em função das variações de um parâmetro do controlador, geralmente o ganho proporcional K . Por meio dessa representação, é possível projetar os controladores de forma a obter características de desempenho específicas no domínio do tempo.

Uma das principais vantagens do LGR é sua capacidade de relacionar diretamente as posições dos polos com métricas de desempenho, como o Máximo Pico, o Tempo de Acomodação e o Sobressinal. Esses parâmetros são essenciais para garantir que os robôs respondam de maneira rápida e estável às variações nos comandos durante o jogo, sem oscilações excessivas ou atrasos significativos.

No processo de sintonia, os critérios de desempenho foram definidos a partir das exigências do campo de jogo, como mudanças rápidas de direção e velocidade. A partir disso, o LGR foi utilizado para ajustar os polos do sistema para posições específicas no plano s , garantindo que o sistema tivesse uma resposta dominada por polos complexos conjugados com frequência natural e amortecimento adequados.

Esse método também permitiu a visualização de como diferentes ajustes no ganho afetavam o comportamento dinâmico do sistema, oferecendo uma abordagem intuitiva e precisa para a sintonia dos controladores. Com a aplicação do LGR, foi possível alcançar um equilíbrio entre estabilidade, precisão e rapidez, fatores indispensáveis para o desempenho competitivo dos robôs.

Para obtenção dos parâmetros utilizam-se as equações (1) (2) (3) (4) (5) (6)

Para obtenção do Fator de Amortecimento:

$$\zeta = \frac{-\ln(M_p)}{\sqrt{\pi^2 + (-\ln(M_p))^2}} \quad (1)$$

Para obtenção do polo da função:

$$s_1 = -\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} = |s_1|\angle\beta \quad (2)$$

Produto do Sistema e da Realimentação:

$$G(s_1)H(s_1) = |G(s_1)H(s_1)|\angle\varphi \quad (3)$$

Cálculos dos parâmetros:

$$K_p = \frac{-\sin(\beta + \varphi)}{|G(s_1)H(s_1)|\sin(\beta)} - 2 \cdot K_i \cdot \frac{\cos(\beta)}{|s_1|} \quad (4)$$

$$K_d = \frac{\sin(\varphi)}{|s_1| \cdot |G(s_1)H(s_1)|\sin(\beta)} + \frac{K_i}{|s_1|^2} \quad (5)$$

$$e_{ss_{\text{rampa}}} = \frac{1}{K_v} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \cdot G(s) \quad (6)$$

Onde K_v é a medida do erro em regime estacionário entre a entrada e a saída do sistema quando a entrada é uma função rampa unitária.

III. DESENVOLVIMENTO

A. Amostragem

A amostragem das medidas de velocidade dos motores, realizada a partir dos dados fornecidos pelos *encoders*, desempenha um papel crucial na caracterização dinâmica dos sistemas de controle dos robôs. Esse processo permite registrar a evolução da resposta do motor a um sinal de entrada em degrau, possibilitando sua aproximação a um modelo típico de sistema de primeira ordem. Tal abordagem está alinhada com os conceitos da identificação de sistemas, que consistem em determinar modelos matemáticos representativos do comportamento dinâmico de sistemas reais com base em dados experimentais [3].

Embora os motores dos robôs sejam projetados para serem idênticos, pequenas variações intrínsecas em suas características de fabricação e condições operacionais resultam em diferenças sutis nas curvas de resposta. Essas variações tornam necessário um estudo individual de cada motor para determinar suas especificidades e garantir a máxima precisão nos ajustes dos controladores.

Além disso, a análise da amostragem fornece informações essenciais, como a constante de tempo e o ganho estático de cada motor, parâmetros indispensáveis para a modelagem e posterior controle do sistema. Esse detalhamento é fundamental

para que os robôs apresentem um desempenho consistente e confiável em campo, especialmente em cenários onde a precisão e a rapidez na resposta são fatores críticos.

Após a amostragem através dos *encoders* obteve-se a curva da Figura 3

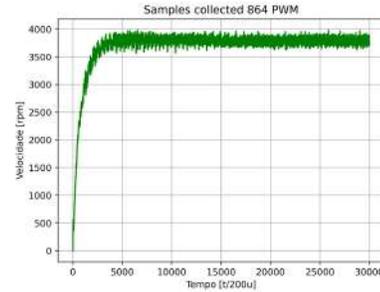


Fig. 3. Curva obtida através de amostragem

B. Levantamento da curva com MatLab

Após obter a curva amostrada, utilizou-se o software *MatLab* para aproximá-la a uma resposta típica de primeira ordem, simplificando a análise e facilitando o ajuste do sistema. A aproximação por um modelo de primeira ordem foi escolhida devido à sua capacidade de representar o comportamento essencial do sistema em condições práticas, permitindo uma avaliação clara dos principais parâmetros de desempenho. A Figura 4 apresenta a resposta do sistema submetido a uma entrada do tipo degrau unitário, condição amplamente utilizada para estudar características transitórias como tempo de subida, tempo de acomodação e estabilização do sistema.

No *MatLab*, funções como *step* foram empregadas para visualizar a resposta simulada do modelo, enquanto a função *lsqcurvefit* foi utilizada para ajustar a curva experimental aos dados teóricos, permitindo a identificação precisa de parâmetros como o Máximo Pico, o Tempo de Estabilização e a Constante de Tempo. Esse processo permitiu uma avaliação detalhada do comportamento do sistema, orientando ajustes mais precisos nos ganhos do controlador PID.

A aproximação a um modelo de primeira ordem auxiliou na simplificação da modelagem e na interpretação dos resultados, destacando aspectos importantes do sistema sem comprometer a fidelidade da análise. Essa simplificação permitiu observar claramente o impacto das configurações do controlador nos parâmetros transitórios, como oscilação e tempo de acomodação, além de facilitar a validação das respostas teóricas em relação aos dados amostrados. O processo assegurou que os parâmetros ajustados fossem consistentes com o comportamento observado experimentalmente, reduzindo a complexidade no ajuste e calibração do controlador.

A equação (7) representa de forma matemática a curva obtida:

$$H(s) = \frac{41890}{s + 7.221} \quad (7)$$

C. Sintonia dos parâmetros

Após realizado o método de sintonia por *LGR (Lugar Geométrico das Raízes)*, obteve-se os valores necessários para os ganhos Proporcional

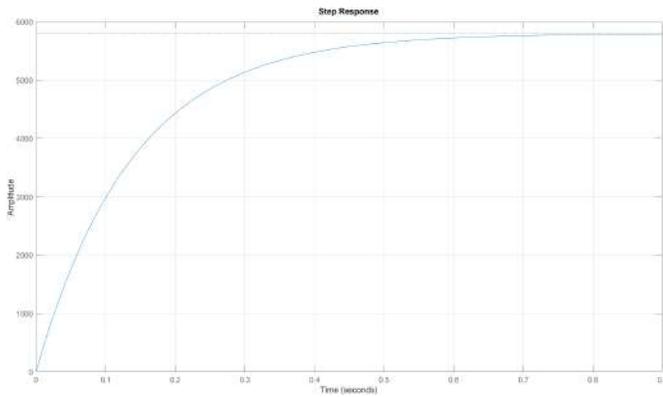


Fig. 4. Curva Aproximada de um dos motores

D. Levantamento da curva com MatLab

(Kp) e Integrativo (Ki) do sistema. O critério adotado para a definição desses parâmetros foi o atendimento a especificações de desempenho, sendo escolhido um Máximo Pico de 0,1 e um Tempo de Acomodação de 40ms. Esses valores foram selecionados após uma série de experimentos com diferentes configurações, nos quais estes apresentaram a melhor combinação entre estabilidade e rapidez na resposta.

O ganho derivativo (Kd) não foi considerado devido à sua baixa relevância no comportamento do sistema. Os valores calculados para este ganho foram próximos de zero, indicando que sua contribuição seria mínima para a resposta do controlador. Além disso, o curto Tempo de Acomodação especificado (40ms) reduz significativamente o impacto de uma ação derivativa, já que mudanças rápidas no erro são corrigidas eficientemente apenas pelas ações Proporcional e Integrativa.

A Figura 5 apresenta o diagrama em blocos do sistema de controle, evidenciando a interação entre o controlador PID e o modelo do sistema controlado. A Figura 6 exibe a resposta do sistema submetido a uma entrada tipo degrau unitário, mostrando o comportamento esperado com baixa oscilação e estabilização dentro do tempo especificado.

Nos testes realizados, foram aplicadas entradas degrau e simulações de condições críticas, como mudanças abruptas de referência e perturbações externas. Observou-se que o sistema controlado pelos ganhos ajustados manteve-se estável, com rápida convergência à condição de regime permanente e erros transitórios reduzidos. A resposta do sistema foi caracterizada por um rápido tempo de estabilização, minimização de oscilações e robustez em situações onde múltiplas variáveis interagem simultaneamente.

Para o cálculo dos parâmetros pelo método de *LGR*, foi realizada a análise gráfica do comportamento do sistema em função dos polos e zeros no plano complexo, o que facilitou a seleção dos valores de Kp e Ki para atender aos critérios de desempenho desejados. O processo também possibilitou a avaliação da influência de diferentes configurações de parâmetros no comportamento dinâmico do sistema, orientando ajustes precisos durante a fase de sintonia.

IV. CONCLUSÃO

Com base nos estudos e testes realizados, conclui-se que o controle PID, ajustado pelo método de *LGR* (*Lugar Geométrico*

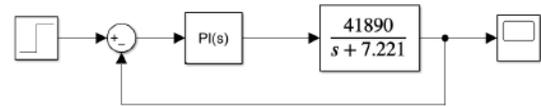


Fig. 5. Diagrama em blocos do sistema

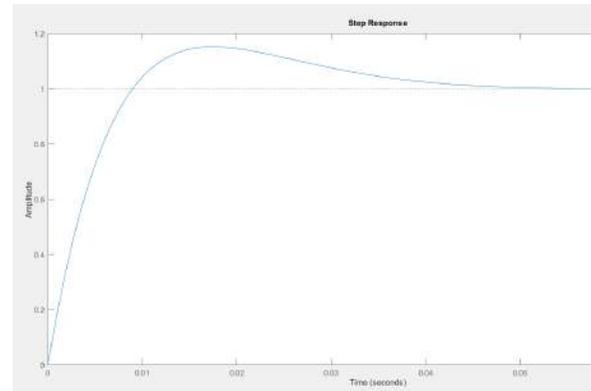


Fig. 6. Resposta do sistema controlado

A. Levantamento da curva com MatLab

das Raízes), mostrou-se uma solução eficiente e robusta para o controle dos robôs da equipe. Durante os experimentos, foram realizados testes em situações que simulam condições reais de jogo, como mudanças abruptas de direção, interações físicas com adversários e ajustes de velocidade em alta intensidade. Os resultados demonstraram que a combinação dessas técnicas proporciona respostas rápidas e estáveis, garantindo a precisão necessária para execução de estratégias ofensivas e defensivas.

A sintonia pelo *LGR* destacou-se como uma ferramenta eficaz, permitindo ajustes precisos nos ganhos do controlador PID de forma visual e sistemática. Esse método auxiliou na identificação das melhores configurações para assegurar estabilidade em altas velocidades e reduzir oscilações no sistema, mesmo em cenários altamente dinâmicos. Além disso, a abordagem combinada permitiu aos robôs alcançar tempos de resposta menores e maior confiabilidade em trajetórias complexas, o que foi evidenciado em testes de corrida em linha reta e mudanças bruscas de trajetória.

Os resultados obtidos confirmaram que a aplicação do controle PID com *LGR* não só otimiza o desempenho individual dos robôs, como também melhora a coordenação geral da equipe, refletindo diretamente na competitividade em jogos oficiais. Assim, a combinação dessas técnicas contribui de maneira significativa para o aprimoramento do desempenho, consolidando a equipe como uma das principais competidoras no cenário mundial de futebol de robôs.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE. *Very Small Size Soccer (VSSS) Rules*. URL: <https://www.cbrobotica.org/wp-content/uploads/2022/05/vssRules.pdf> (acesso em 20/06/2022).
- [2] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*. 5th. Prentice Hall, 2010.

- [3] Luiz Antonio Aguirre. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 2nd. Editora UFMG, 2007.
- [4] Richard C. Dorf e Robert H. Bishop. *Sistemas de Controle Modernos*. 12ª ed. São Paulo: Pearson, 2013. ISBN: 978-8-577-48229-6.
- [5] Dewesoft. *PID Control Course*. Acesso em: nov. 2024. URL: <https://training.dewesoft.com/online/course/pid-control>.

AUTORES



Davi Rosim é graduando em Engenharia de Software pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações, membro da Robotbulls - equipe de robótica, desenvolvendo algoritmos de controle e tomada de decisão baseados em inteligência artificial, competindo pela categoria Very Small Size Soccer (VSSS).

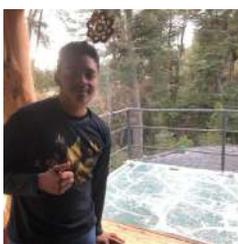


Edmundo Henrique de Paiva Silva é graduando em Engenharia Biomédica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações, monitor de Analógica III, Controle de Sistemas Dinâmicos e Eletrônica Básica. Coordena os campeonatos da categoria de Futebol Mini e é do comitê técnico da nova categoria Robocup, o SSL Entry Level. Também é técnico em

Equipamentos Médicos pela ETEFMC.



Enzo Rodrigues Ribeiro Lemos é graduando no curso de Engenharia de Controle e Automação pelo INATEL (Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações). Foi voluntário na Cas@Viva, na reciclagem de lixo eletrônico. Ele também é membro ativo da equipe de robótica RobotBulls, participando da categoria VSSS (Very Small Size Soccer).



Guilherme Virgulino é graduando em Engenharia Biomédica pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações, bolsista da Robotbulls - Laboratório de robótica e tesoureiro do capítulo de OPTICA pela mesma

instituição.



João Delfino é graduando em Engenharia de Computação pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações, atuante na equipe de robótica RobotBulls. Estagiário em Desenvolvimento de Software Embarcado na empresa Encora Inc. Técnico em Controle e Automação (2019) pela Escola Técnica de Eletrônica - ETE "FMC".



Kaynan Henrique Dias de Melo é graduando no curso de Engenharia de Computação pelo INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações) e membro ativo da equipe de robótica RobotBulls, competindo pela categoria Very Small Size Soccer (VSSS).



Marco Carnevali é graduando em Engenharia de Controle e Automação pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações. Além disso, é capitão da equipe de VSSS da Robotbulls, monitor nos laboratórios de Redes Industriais, Indústria 4.0, monitor de Robótica Industrial e Circuitos Magnéticos e Trifásicos e estagiário no laboratório do time de robótica do Inatel.

Desenvolvimento de um Robô para Competição na Categoria de Sumô 3kg

Alexandre Baratella Lugli, Egídio Raimundo Neto, Eugênio Moreira Jonas da Silva, Luiz Fernando Domiciano Ribeiro dos Santos, Samile Costa Barbosa, Samuel Silva Oliveira, Wanderson Eleutério Saldanha

Abstract— This article presents the development process of a 3 kg sumo robot, using Excalibull, a project from the Robotics and Artificial Intelligence Laboratory at Inatel (RobotBulls), as a case study. The methodology involves the analysis of competition rules, selection and integration of mechanical and electronic components, and the design of combat strategies. Although the robot was not tested in official matches, the project resulted in a functional prototype and significant learning outcomes in embedded systems, control, and mechanical design. This work contributes to practical engineering education and serves as a foundation for future improvements and competition participation.

Index Terms— sumo robot, competition, embedded systems, mechanical design, control

Resumo— O presente artigo apresenta o processo de desenvolvimento de um robô da categoria sumô de 3 kg, utilizando o Excalibull, projeto do Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do Inatel (RobotBulls), como modelo de estudo. A metodologia adotada envolveu a análise das regras da competição, a escolha e integração dos componentes mecânicos e eletrônicos, além da definição de estratégias de combate. Embora o robô não tenha participado de competições oficiais, foi construído um protótipo funcional, possibilitando aprendizados relevantes nas áreas de sistemas embarcados, controle e projeto mecânico. Este trabalho contribui para a formação prática em engenharia e estabelece uma base sólida para futuras melhorias e participações competitivas.

Palavras Chave— robô, sumô, competição, sistemas embarcados, projeto mecânico, controle

I. INTRODUÇÃO

O avanço da robótica tem proporcionado não apenas inovações tecnológicas, mas também novos desafios que estimulam a criatividade, o aprendizado e a aplicação prática de conceitos interdisciplinares. Entre essas iniciativas, as competições de robôs, como o sumô de robôs, se destacam como ambientes voltados ao desenvolvimento de soluções criativas e eficazes.

Neste contexto, o robô Excalibull, desenvolvido no Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do Inatel (RobotBulls) [1] (ver Figura 1), é adotado como modelo de estudo para a categoria sumô 3 kg, conhecida por exigir um equilíbrio entre força, agilidade, limitação de peso e o uso eficiente de sensores de borda e de oponente.

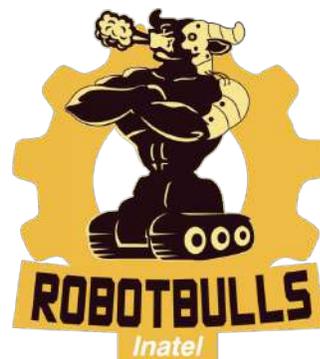


Fig. 1. Equipe de Robótica e Inteligência Artificial – RobotBulls.

O objetivo deste artigo é apresentar o processo de desenvolvimento de um robô da categoria sumô 3 kg, abordando desde a escolha dos componentes mecânicos e eletrônicos até a definição de estratégias de atuação.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta as regras da competição; a Seção III descreve o projeto mecânico; a Seção IV aborda os aspectos eletrônicos; a Seção V trata das estratégias de atuação; a Seção VI discute o processo de montagem; a Seção VII traz considerações sobre os aprendizados obtidos; e a Seção VIII apresenta a conclusão.

II. REGRAS

A categoria Sumô 3 kg segue as diretrizes do All Japan Robot-Sumo Tournament (AJRST) [2]. As regras estão divididas nos seguintes tópicos:

- **Dohyo:** A arena é uma estrutura circular de alumínio com 154 cm de diâmetro, coberta por uma chapa preta de SPCC (ou aço equivalente) com 6,35 mm de espessura. A borda branca de 5 cm, chamada *Tawara*, é considerada parte da arena. O *Shikiri-Sen*, utilizado para o posicionamento inicial, é composto por duas linhas marrons de 20 cm de comprimento e 2 cm de largura, localizadas a 10 cm do centro (ver Figura 2). Ao redor da arena encontra-se o *Yochi*, uma área quadrada de 360 cm de lado com material livre, voltada à segurança.

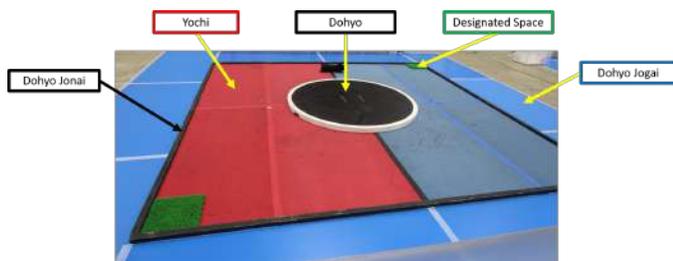


Fig. 2. Estrutura do Dohyo

- **Especificações dos robôs:** O robô deve pesar no máximo 3.000 g, incluindo todos os componentes (exceto o controle remoto, se aplicável). Suas dimensões iniciais não podem ultrapassar 20 cm x 20 cm, sem restrições de altura. São proibidos dispositivos que prejudiquem o oponente ou danifiquem a arena, como lasers, líquidos, gases, pós, ignições, mecanismos de arremesso, ventosas, colas ou componentes abrasivos.
- **Partidas:** As partidas são compostas por até três rounds, com duração máxima de um minuto cada. O vencedor é o robô que conquistar primeiro dois pontos chamados *Yuko*. Esses pontos podem ser obtidos de três formas: *Yuko*, quando o robô empurra o adversário para fora da arena ou o faz tocar a área do *Yochi*; *Shinitai*, quando um robô sai parcialmente do *Dohyo* e não retorna em até três segundos; e *Yusei*, um ponto atribuído pelos juízes com base na superioridade técnica ou estratégica apresentada durante o round.

No início de cada round, os robôs devem ser posicionados dentro das linhas do *Shikiri-Sen*, sem ultrapassá-las (ver Figura 3). Após o posicionamento, os competidores devem deixar a arena imediatamente.

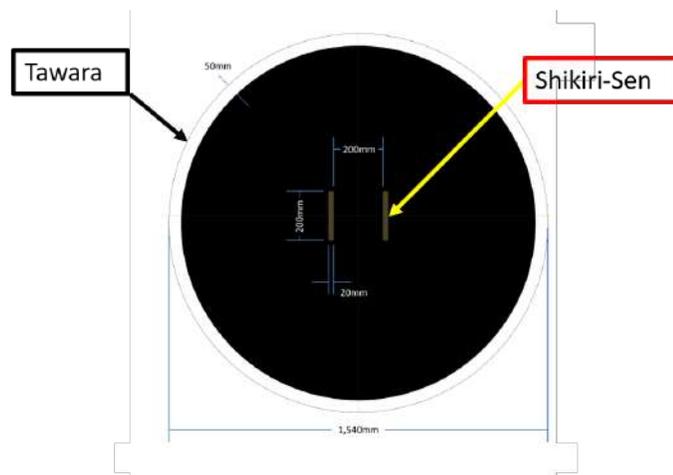


Fig. 3. Detalhes do Shikiri-Sen e Tawara

III. MECÂNICA

A estrutura mecânica de um robô de Sumô exige um equilíbrio eficiente entre capacidades ofensivas e defensivas. No caso do robô modelo, adotou-se uma estrutura robusta, projetada para resistir a impactos diretos, mantendo a agilidade necessária para a movimentação no *Dohyo*.

A carcaça do modelo foi dividida em duas camadas: a inferior, responsável por acomodar os componentes mecânicos, e a superior, destinada aos elementos eletrônicos. Ambas são separadas por um mancal de fibra de carbono, que atua como proteção adicional para os circuitos, minimizando os danos em situações de colisão.

Para a base do robô, optou-se pelo uso do alumínio 6061, um material não magnético, conhecido por sua leveza e alta resistência mecânica. Embora a fibra de carbono seja amplamente utilizada na construção de robôs, sua rigidez estrutural não se mostrou adequada para suportar as cargas envolvidas nesta aplicação, tornando o alumínio a escolha mais apropriada.

Fixados à base do robô, estão ímãs de neodímio [3] (Figura 4), utilizados para aumentar a força de aderência ao *Dohyo*. Essa técnica amplia a força normal exercida pelo robô sobre a superfície da arena, gerando maior estabilidade e resistência ao recuo durante as disputas. Trata-se de uma prática comum na categoria, com impacto direto no desempenho. No *Excalibull*, foram empregados os modelos BX082CS-S-N52 e BC82CS-N-N52, com forças de tração de 11,03 e 8,83 libras, respectivamente.

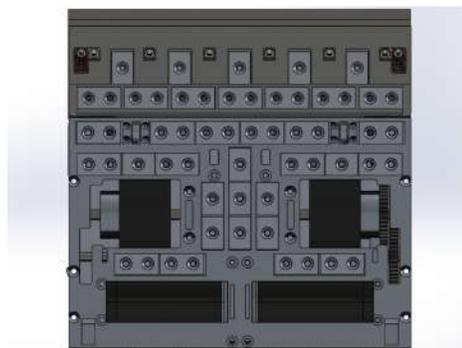


Fig. 4. Estrutura de Ímãs na base do *Excalibull*

A seleção dos motores e do sistema de transmissão é determinante para assegurar movimentos precisos e eficazes, conciliando potência com controle. No *Excalibull*, foram adotados motores Maxon RE40 [4], como mostra a Figura 5, reconhecidos por sua alta eficiência e confiabilidade em aplicações de robótica competitiva. Esses motores estão acoplados a um sistema de engrenagens da *JSumo* [5], com redução de 1:10,71.

Essa relação de transmissão significa que, para cada 10,71 rotações do motor, o eixo da roda realiza apenas uma volta. Essa redução permite multiplicar o torque disponível nas rodas, tornando o robô capaz de aplicar maior força nos empurrões contra os adversários. Embora a velocidade angular final seja reduzida, essa configuração foi escolhida estrategicamente para priorizar força e controle em detrimento da velocidade bruta, o que é ideal para confrontos em arenas limitadas como o *Dohyo*.

O sistema de tração é complementado por rodas de 30x40 mm, confeccionadas em borracha de silicone de alta resistência. Esse material oferece excelente aderência à superfície do *Dohyo*, garantindo estabilidade e tração mesmo sob acelerações bruscas ou colisões.



Fig. 5. Motor Maxon RE40

O Excalibull conta com um sistema de suporte de lâmina móvel, que permite ajustar a inclinação da lâmina durante os combates. Este mecanismo dinâmico é essencial para absorver impactos e se adaptar à altura ou movimentação dos adversários, garantindo que o equipamento mantenha contato com o chão. Como resultado, o sistema proporciona maior tração e estabilidade, além de aprimorar a eficácia nos ataques frontais.

Conforme mostrado na Figura 6, o suporte de lâmina móvel otimiza a performance do robô, oferecendo uma flexibilidade adicional durante o combate.

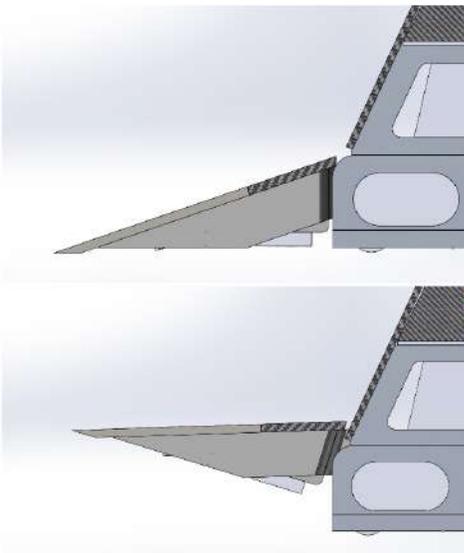


Fig. 6. Sistema de Lâmina Móvel

IV. ELETRÔNICA

Os componentes eletrônicos do Excalibull foram selecionados e configurados para garantir a máxima eficiência e precisão. O driver Roboclaw 2x60AHV [6] é responsável pelo controle da potência dos motores Maxon RE40, proporcionando estabilidade mesmo sob altas cargas. A alimentação do robô é assegurada por duas baterias Tattu 6S LiPo de 1050mAh, que fornecem a energia necessária para o desempenho nas competições.

Conforme ilustrado na Figura 7, o driver Roboclaw 2x60A é um dos componentes-chave para o controle eficiente dos motores e para a gestão de energia do Excalibull.



Fig. 7. Driver Roboclaw 2x60A

Para a detecção do oponente em modo autônomo, o robô utiliza cinco Sensores Indutivos [7]. Adicionalmente, dois sensores de linha, posicionados abaixo da lâmina, detectam a *Tawara* (borda branca) ao redor do *Dohyo*, acionando uma interrupção no sistema e evitando que o robô ultrapasse os limites da arena. A disposição e configuração desses sensores foram otimizadas de acordo com as diretrizes do *Sumo Robot Black Book* (2017) [8], um manual especializado para a construção de robôs de sumô.

O sistema de controle do Excalibull é baseado no microcontrolador *Blackpill*, complementado por um módulo ESP32-WROOM (Figura 8), que possibilita a conexão via *Bluetooth* com um controle de *PlayStation 4*. Em modo autônomo, as estratégias são programadas utilizando um comando de 3 bits, que define direções e ações predefinidas (por exemplo, E02 para "Jogada 2 à Esquerda" ou D10 para "Jogada 10 à Direita"). Esse sistema permite que o Excalibull execute movimentos estratégicos com precisão, com base no comando do juiz [2].



Fig. 8. ESP32-WROOM

V. MODALIDADES DE COMPETIÇÃO

A categoria de robôs de sumô 3 kg possui duas modalidades distintas: *Rádio Controlado* (RC) e *Autônoma*. Essas modalidades são organizadas de forma que robôs autônomos competem exclusivamente contra outros robôs autônomos, enquanto os rádio controlados enfrentam apenas concorrentes da mesma categoria.

Embora existam essas divisões, é possível que um robô seja configurado para operar em ambas as modalidades, como é o caso do Excalibull. Nos robôs rádio controlados, um controle externo é utilizado para direcionar o robô, sendo necessário também um receptor no circuito para receber os comandos transmitidos.

Por outro lado, os robôs autônomos operam de maneira independente, sendo controlados por um programa pré-definido. Esse programa utiliza informações captadas por sensores para

orientar o robô dentro da arena e tomar decisões estratégicas durante o combate. Esse tipo de robô não requer interação direta do operador durante a competição, pois todas as ações são previamente programadas.

VI. MONTAGEM DO ROBÔ

A integração entre o microcontrolador *Blackpill* e o módulo ESP32 foi otimizada com o uso de uma placa personalizada, projetada no software *EasyEDA* [9]. A ferramenta permitiu o desenvolvimento de um *layout* compacto, com rotas de corrente otimizadas e separação adequada entre sinais digitais e linhas de potência, minimizando interferências eletromagnéticas. Também foram realizados ajustes de *footprint* para garantir a precisão no encaixe dos componentes e a dissipação térmica adequada. Esses cuidados resultaram em uma conexão direta e eficiente entre os módulos de controle e os drivers dos motores, favorecendo tanto o desempenho quanto a manutenção do robô.

Para o desenvolvimento mecânico, foi utilizado o *SolidWorks* [10], onde cada peça do *Excalibull* foi modelada individualmente e testada em simulações estruturais. A ferramenta possibilitou análises de tensões nos suportes da lâmina móvel, indicando pontos de reforço necessários para suportar impactos durante os combates. Além disso, estudos de centro de massa foram conduzidos para garantir o equilíbrio do robô, contribuindo diretamente para sua tração e estabilidade. A modelagem em ambiente virtual também permitiu o cálculo preciso do peso total e a experimentação com diferentes materiais antes da fabricação final, otimizando o projeto com base nos requisitos estratégicos da competição.

VII. ESTRATÉGIAS DE COMBATE

A estratégia principal do *Excalibull* é adotar um confronto direto com o oponente, utilizando a lâmina frontal para empurrá-lo com eficiência para fora do *Dohyo*. Essa abordagem agressiva é aplicada tanto no modo RC quanto no modo autônomo, aproveitando o design da lâmina para garantir um empurrão eficaz e uma vantagem estratégica.

Embora estratégias defensivas tenham sido consideradas durante o projeto, como recuos táticos ou giros para desorientar o adversário, optou-se por não implementá-las no estágio atual devido à natureza agressiva do *Excalibull* e ao foco em confrontos rápidos e resolutivos. A lógica adotada priorizou ataques frontais diretos, aproveitando ao máximo o design da lâmina ajustável e a tração dos motores. Essa decisão foi tomada com base em testes práticos e observações de combates anteriores, onde abordagens passivas resultaram em menor taxa de sucesso.

A. Validação e Testes

Após a conclusão da montagem do *Excalibull*, foram realizados testes práticos para validar o desempenho dos sistemas mecânicos, eletrônicos e de controle. O protótipo funcional demonstrou estabilidade sob carga, boa resposta nos comandos RC e execução precisa de movimentos programados no modo autônomo. Em simulações e testes reais contra robôs de categorias semelhantes, o *Excalibull* obteve sucesso ao empurrar oponentes para fora do *Dohyo*, validando o design da lâmina e o sistema de tração.

Esses testes também permitiram ajustes finos nos parâmetros dos sensores e nos comandos de ataque, além da identificação de melhorias no posicionamento dos sensores de linha para maior confiabilidade em cenários de borda.

VIII. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do robô *Excalibull* proporcionou uma oportunidade valiosa de aplicar e integrar conhecimentos de mecânica, eletrônica e estratégias de combate em um projeto prático e desafiador. A abordagem multidisciplinar adotada foi essencial para alcançar um design eficiente, com soluções técnicas que visam alto desempenho nas competições da categoria Sumô 3kg.

Embora o projeto tenha avançado significativamente em termos de estrutura mecânica, integração eletrônica e definição de estratégias ofensivas, o robô ainda se encontra em fase de testes e ajustes. Um protótipo funcional foi construído e validado em simulações e testes práticos, revelando bom desempenho em empurrões frontais e controle de movimentação. Contudo, o robô ainda não está completamente pronto para participar de competições oficiais.

Durante o desenvolvimento, decisões como a não adoção de estratégias defensivas foram pautadas em testes e na observação de resultados, privilegiando um estilo de combate direto e agressivo. A escolha por essa abordagem reflete uma lógica baseada em eficiência e eficácia nos combates curtos, característica comum em torneios da categoria.

Por fim, este trabalho reforça a importância de iniciativas como as competições de robótica para promover o aprendizado prático, estimular o trabalho em equipe e incentivar a busca por soluções criativas e tecnológicas. Os resultados obtidos até o momento representam uma base sólida para futuras otimizações, aproximando o *Excalibull* de seu objetivo: competir em alto nível em eventos oficiais.

REFERÊNCIAS

- [1] Inatel. *Robótica - Inatel*. URL: <https://inatel.br/robotica/> (acesso em 05/12/2024).
- [2] FSI Robotics. *Sumo Robot Rules*. URL: <https://www.fsi.co.jp/sumo/robot/en/Rules.html> (acesso em 06/12/2024).
- [3] K&J Magnetics. *Neodymium Magnets Specifications BX082CS-S-N52 and BC82CS-N-N52*. URL: <https://www.kjmagnetics.com> (acesso em 06/12/2024).
- [4] Maxon Motors. *DC motor RE40 technical specifications*. URL: <https://www.maxongroup.com/re40> (acesso em 05/12/2024).
- [5] JSumo Robotics. *JSumo Sumo Robot Parts - Gears and Wheels*. URL: <https://www.jsumo.com> (acesso em 06/12/2024).
- [6] BasicMicro. *RoboClaw Motor Controllers - Product Information*. URL: <https://www.basicmicro.com> (acesso em 06/12/2024).
- [7] Sense. *Sensores Industriais*. URL: https://www.sense.com.br/siter/familias/1?qad_source=1&gclid=Cj0KQCQiA57G5BhDUARIsACqCYnzKhVdxouGdFotJJ4qWLT7e90NmdBjvPni4-RxngqArqdEALw_wcB (acesso em 06/12/2024).

- [8] JSumo. *Sumo Black Book (Ebook) - Tips & Tactics for Better Sumo Robots*. JSumo, 2017. URL: <https://www.jsumo.com/sumo-robot-blackbook-pdf-ebook-tips-tactics-for-better-sumo-robots> (acesso em 06/12/2024).
- [9] EasyEDA. *Online PCB Design & Circuit Simulator*. URL: <https://easyeda.com> (acesso em 06/12/2024).
- [10] Dassault Systèmes. *SolidWorks 3D CAD Software*. URL: <https://www.solidworks.com> (acesso em 06/12/2024).

AUTORES



Alexandre Baratella Lugli possui curso técnico em eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica "Francisco Moreira da Costa" (1999), graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2004), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2007) e doutorado em

Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2013). Atualmente, é coordenador de cursos superiores em Controle e Automação (Engenharia e Tecnologia) do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e professor de curso superior do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle de Processos Eletrônicos, Retroalimentação, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, ethernet, meios físicos, instrumentação industrial, atuadores industriais e controladores industriais.



Egídio Raimundo Neto possui Graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (12/2011) e Mestrado em Telecomunicações também pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (03 / 2014). Trabalha atualmente como Professor do Instituto Nacional de

Telecomunicações nos cursos de Engenharia e Tecnologia. As principais áreas de interesse são: Sistemas de Controle Clássico, Discreto e Moderno, Redes Industriais, Robótica, Drones Autônomos, Sistemas Eletrônicos de Potência e SmartGrid.



Eugênio Moreira Jonas da Silva é engenheiro de Controle e Automação pelo Inatel, atua como especialista em projetos de controle e automação no Inatel e faz parte da coordenação do laboratório de robótica e inteligência artificial da instituição. Lidera a organização da Olimpíada Nacional de Robótica

2025, como parte do projeto Nativos do Futuro, visando alcançar todas as regiões do Brasil. Além disso, fez parte da

equipe de coordenação da FETIN 2024 e está novamente à frente da FETIN 2025. Também é professor no SENAI, onde contribui com seu conhecimento para os cursos técnicos de automação e eletrônica.



Luiz Fernando Domiciano Ribeiro dos Santos é graduado pelo INATEL em Engenharia Elétrica. Atualmente é Especialista de Sistemas com foco em Energias Renováveis, no INATEL onde trabalha com a equipe de robótica e administra os laboratórios de elétrica e automação.



Samuel Silva Oliveira é graduando em Engenharia de Controle e Automação no Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL. Bolsista de Iniciação Científica no Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do INATEL - RobotBulls, onde atua na categoria de drone autônomo e rádio controlado. Tem interesse pelas áreas de Robótica, Automação Industrial e Inteligência Artificial.



inteligência artificial.

Samile Costa Barbosa é estudante do 4º período de Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, atualmente bolsista de Iniciação Científica no Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial - Robotbulls, atuando na categoria de Sumô Lego. Possui interesse pela área de desenvolvimento de software para



Wanderson Eleutério Saldanha trabalha com pesquisa e desenvolvimento desde 1996, com larga experiência no gerenciamento de projetos, capacitação de profissionais e na gestão de pessoas e recursos. Formado como técnico em eletrônica pela Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa - ETEFMC (1995), graduado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL (2000), pós-graduado em Docência do Ensino Superior pelo Centro de Ensino Superior em Gestão, Tecnologia e Educação - FAI (2012), Mestre em Engenharia Elétrica na área de Automação e Sistemas Elétricos Industriais pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (2016) e atualmente trabalha em sua tese de doutorado. Atua como professor no Instituto Nacional

de Telecomunicações - INATEL nos cursos de graduação e pós-graduação. Realiza pesquisas e desenvolvimentos através da orientação de trabalhos práticos para mostras acadêmicas anuais, trabalhos para conclusão de curso e projetos no programa de iniciação científica.

Desenvolvimento de Sistemas de Navegação e Controle para Robôs Autônomos Trekking

Ewel Fernandes Pereira, Mayara do Prado Almeida e Tobias Bueno Pereira
Alexandre Baratella Lugli, Egídio Raimundo Neto, Eugênio Moreira Jonas da Silva, Wanderson Eleutério Saldanha

Abstract—

This paper discusses the navigation systems of trekking robots, designed to explore difficult terrains such as mountains and forests, using sensors and autonomous navigation. The focus is on understanding how these systems enable robots to perform tasks in hard-to-reach environments, such as scientific research and rescue operations. The robots' adaptability, durability, and autonomy are crucial for their effective operation in challenging conditions.

Palavras-chave: Robô, Trekking, desenvolvimento, navegação.

Este artigo aborda os sistemas de navegação de robôs de trekking, projetados para explorar terrenos difíceis, como montanhas e florestas, utilizando sensores e navegação autônoma. O foco é entender como esses sistemas permitem que os robôs realizem tarefas em ambientes de difícil acesso, como em pesquisas científicas e resgates. A adaptação, resistência e autonomia dos robôs são essenciais para sua operação eficaz em condições desafiadoras.

I. SOBRE A CATEGORIA TREKKING

A modalidade Robô Trekking foi criada para incentivar o desenvolvimento de veículos autônomos de alto nível, utilizando tecnologias como inteligência artificial, visão computacional e sensores espaciais. O objetivo é criar robôs que possam operar de forma totalmente independente. Durante a competição, os robôs devem funcionar sem intervenção manual ou qualquer ajuda externa, seja por cabo ou rádio. A única exceção é o sistema de segurança, que pode ser ativado pelo juiz em casos de falhas mecânicas ou situações perigosas. Esse sistema, sem fio, desliga o robô automaticamente para evitar danos ao próprio equipamento ou aos outros competidores.

Em termos de dimensões físicas, os robôs devem seguir limites técnicos específicos. O tamanho máximo permitido é de 500x500x500 mm, e eles não podem ter partes perigosas, como bordas afiadas ou pontas cortantes. Todos os robôs passam por uma inspeção técnica antes do início da competição, e qualquer alteração não autorizada no projeto pode levar à desclassificação.

A competição pode ser realizada em ambientes internos ou externos, com o percurso desafiando os robôs a superar obstáculos como rampas, desníveis e buracos, além de condições climáticas difíceis em competições ao ar livre. O percurso inclui quatro pontos de controle posicionados aleatoriamente, e os robôs devem passar por eles em ordem específica. A cada passagem, um sistema de luz é acionado, indicando que o ponto foi alcançado corretamente.

Além dos pontos obrigatórios, o trajeto pode incluir passagens opcionais que concedem bônus de tempo, variando entre 0,1 e 0,9 segundos, dependendo da dificuldade. Esses bônus são

somados, mas cada passagem pode ser usada apenas uma vez, exigindo que a equipe faça um planejamento estratégico para equilibrar a redução do tempo com a necessidade de completar o percurso.

As tentativas são cronometradas de forma rigorosa. Cada robô tem direito a três tentativas por dia, realizadas em sequência. O tempo máximo para completar o percurso é de 10 minutos, com o cronômetro começando quando o robô é colocado na pista e parando quando o último ponto de controle é alcançado. Se o robô sair da pista, bater em obstáculos ou não conseguir superar um desafio, a tentativa é invalidada, registrando-se o tempo até o último ponto atingido.

Além disso, as equipes devem apresentar documentação técnica. As três equipes mais rápidas devem enviar um fluxograma simplificado que descreva como o robô funciona, incluindo as estratégias de navegação e tomada de decisões. O fluxograma precisa ser claro o suficiente para que os juizes compreendam o funcionamento do robô. A falta de documentação válida ou ajustes no projeto pode levar à desclassificação.

A classificação final é determinada pelo menor tempo registrado para completar o percurso. Se nenhum robô alcançar todos os pontos de controle, o critério será o tempo até o terceiro, segundo e, finalmente, o primeiro ponto de controle. Somente os robôs que atingirem pelo menos o segundo ponto de controle são elegíveis para premiação.

Durante as tentativas, a pista é restrita a uma equipe por vez. Apenas um membro da equipe pode ficar perto da pista, mantendo uma distância mínima de três metros do robô para evitar interferência. Caso o robô não comece a se mover dentro de 30 segundos após a autorização do juiz, será penalizado com um "false start", o que pode levar à desclassificação.

Em resumo, a modalidade Robô Trekking não só promove o avanço da tecnologia em robótica autônoma, mas também desafia as equipes a criarem soluções inovadoras que atendam aos requisitos técnicos e superem obstáculos com eficácia.

II. CONTEXTUALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO NA CATEGORIA TREKKING

Os sistemas de navegação desempenham um papel crucial para que um robô funcione de forma totalmente autônoma e atenda aos requisitos das competições. Esses sistemas são responsáveis por guiar o robô por trajetos complexos, reconhecer obstáculos e tomar decisões para garantir que ele cumpra todas as etapas do percurso de maneira eficiente e veloz.

A navegação autônoma pode ser integrada a partir de diversas tecnologias, como sensores de proximidade, câmeras, sistemas de visão computacional, algoritmos de inteligência artificial, entre outros. Esses componentes permitem ao robô mapear o ambiente ao seu redor, identificar os pontos de controle obrigatórios e obstáculos, além de conseguir calcular as melhores

rotas para alcançar os objetivos estabelecidos.

Por fim, a autonomia completa exige que o robô seja capaz de operar sem qualquer intervenção humana, desde o início da prova até o fim. Isso significa que o sistema de navegação deve ser robusto o suficiente para funcionar de forma independente. Portanto, investir em sistemas de navegação avançados não é apenas uma exigência técnica, mas também um diferencial estratégico para equipes que buscam vencer as competições e desenvolver um robô de excelência.

III. COMPONENTES DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

O sistema de navegação é composto por diversos componentes que operam de forma integrada, possibilitando que o robô atue de maneira autônoma e eficiente durante a competição. A seguir, descrevemos os principais elementos e suas funções.

A. MPU: Giroscópio para Definição do Ângulo de Referência Inicial

A Unidade de Medida Inercial (MPU) desempenha um papel essencial ao utilizar o giroscópio para determinar o ângulo de referência inicial do robô [1]. No início da prova, o giroscópio mede a orientação angular em relação aos três eixos principais (x , y , z). A partir dessas informações, o ângulo inicial do robô é definido e utilizado como base para correções de direção ao longo do percurso. Esse mecanismo é fundamental para garantir que o robô mantenha sua trajetória mesmo ao enfrentar curvas ou inclinações.

B. Câmera: Detecção de Imagens

A câmera é responsável pela captura de imagens do ambiente ao redor do robô. Essas imagens são fundamentais para a navegação autônoma, pois permitem a identificação de obstáculos, marcos de controle e passagens opcionais. Após capturadas, as imagens são enviadas para processamento, permitindo que o robô tome decisões em tempo real.

C. Jetson: Processamento de Imagens

O Jetson é a unidade computacional dedicada ao processamento das imagens fornecidas pela câmera. Utilizando algoritmos de visão computacional e inteligência artificial, o Jetson analisa os dados visuais para identificar elementos críticos do percurso, como obstáculos e pontos de controle. Com base nessas análises, ele toma decisões autônomas, orientando os movimentos do robô para maximizar o desempenho na prova.

D. Encoder: Sensor de Efeito Hall

Os encoders utilizam o princípio do efeito Hall para monitorar a rotação das rodas ou eixos do robô [2]. A resolução de um encoder é determinada pela quantidade de pulsos gerados por cada rotação completa, o que depende do número de ímãs ou marcas presentes em seu disco. Encoders com alta resolução fornecem dados mais precisos sobre a posição e a velocidade das rodas, permitindo ao robô realizar ajustes de deslocamento com maior exatidão. O funcionamento baseia-se na detecção de alterações no campo magnético gerado pelos ímãs [3], que são convertidas em sinais digitais para processamento.

E. Integração dos Componentes

A integração dos componentes citados é essencial para que o sistema de navegação funcione de forma eficiente e autônoma. Durante a competição, a MPU fornece os dados iniciais de orientação do robô, enquanto a câmera captura imagens do percurso. As imagens são processadas pelo Jetson, que analisa os dados visuais e toma decisões sobre o caminho a seguir. Ao mesmo tempo, os encoders monitoram a movimentação do robô, garantindo que ele percorra as distâncias corretas e faça ajustes necessários na trajetória.

Os dados de todos os sensores são coordenados por algoritmos avançados, que permitem ao robô responder de forma rápida e precisa aos desafios do trajeto. A sinergia entre os componentes é indispensável para garantir o sucesso do robô e o cumprimento dos objetivos da competição.

IV. O SISTEMA DE POSICIONAMENTO

O sistema de posicionamento é uma das principais partes do robô, responsável por garantir que ele navegue de forma eficiente e precisa. Esta seção aborda sua arquitetura, funcionamento e possíveis aplicações práticas.

A. Arquitetura

A arquitetura do sistema de posicionamento é projetada de forma a otimizar a integração entre os componentes e a eficiência do robô. Os encoders estão estrategicamente posicionados nas rodas motrizes, permitindo que o robô calcule com precisão a distância percorrida e a velocidade de cada roda. Essa disposição é essencial para ajustar a direção e garantir que o robô permaneça alinhado ao trajeto.

Além disso, a câmera é posicionada em uma área elevada e centralizada no robô, proporcionando uma visão ampla do ambiente à frente. Isso facilita a captura de imagens com maior campo de visão, garantindo que obstáculos e marcos sejam detectados com antecedência suficiente para a tomada de decisões.

A MPU é instalada em uma área estável e de fácil acesso, minimizando interferências externas que possam comprometer a medição dos ângulos. Essa organização garante que todos os componentes funcionem de forma coordenada, contribuindo para a precisão do sistema de posicionamento.

B. Fluxograma

O funcionamento do sistema de posicionamento é representado por um fluxograma simplificado. Ele descreve como os componentes interagem e como as decisões autônomas são tomadas. O fluxo inicia-se com a aquisição de dados pelos sensores (encoders, câmera e MPU), seguida pelo processamento das informações no Jetson. O sistema avalia as condições do ambiente e ajusta as ações do robô, como mudanças de direção, velocidade ou paradas estratégicas.

C. Implementação

O sistema de posicionamento desenvolvido para o robô pode ser aplicado a diversas situações no mundo real. Um exemplo prático é o uso em fábricas para a entrega de peças de forma autônoma. Equipados com sistemas de navegação semelhantes, robôs podem transportar materiais entre estações de trabalho,

otimizando processos logísticos e reduzindo a necessidade de intervenção humana.

Outra aplicação relevante é o uso em armazéns e centros de distribuição. Robôs autônomos podem localizar produtos específicos, transportá-los até áreas de embalagem e auxiliar na gestão de estoques, aumentando a eficiência operacional. Além disso, em ambientes urbanos, sistemas similares podem ser aplicados a entregas automatizadas de mercadorias, contribuindo para a logística de última milha.

Esses exemplos demonstram como a tecnologia desenvolvida para competições robóticas pode ser adaptada para resolver desafios práticos e melhorar processos em diferentes setores industriais e sociais.

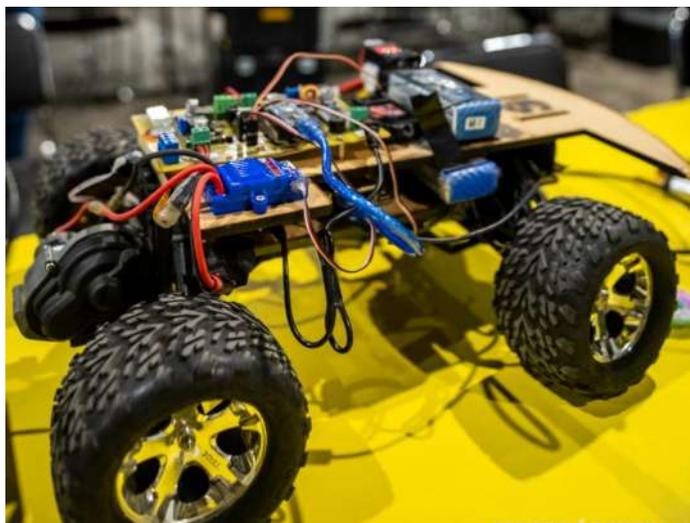


Fig. 1. Robô Bullratella - Robotbulls

V. RESULTADOS

Com o uso desse sistema, diversos resultados foram alcançados nas principais competições de robótica no Brasil, sendo essas a IronCup, a RSM Challenge e a Robocore Experience (RCX)

A. IronCup 2024

A IronCup é sediada no Instituto Nacional de Telecomunicações, onde a equipe RobotBulls atua. Conseguimos conquistar primeiro lugar na edição de 2024, com o robô Bullratella, vencendo várias outras equipes importantes, como a ThunderRatz (Poli-USP) e a Phoenix (UNICAMP).

B. RSM Challenge Internacional 2024

A RSM Challenge acontece anualmente em Mogi das Cruzes, trazendo competidores de diversos países. Nela, o robô Bullratella também se consagrou com o troféu de 1º lugar.

C. Robocore Experience 2024

A Robocore Experience aconteceu durante 16ª edição da Campus Party São Paulo, com mais de 1300 membros inscritos, sendo a maior competição de robótica que participamos no Brasil. Nessa competição robô Bullratella conseguiu conquistar o 2º lugar do pódio.

VI. CONCLUSÃO

Conclui-se que os sistemas de navegação são indispensáveis para garantir a autonomia dos robôs na modalidade Trekking. Sem esses sistemas, os robôs seriam incapazes de realizar tarefas essenciais, como determinar sua localização no ambiente, planejar rotas e evitar obstáculos de forma eficiente. A integração de tecnologias como sensores, câmeras e algoritmos de inteligência artificial permite que o robô opere de maneira totalmente independente, desde a partida até a conclusão do percurso, sem intervenção humana. Portanto, o desenvolvimento de sistemas de navegação robustos é fundamental não apenas para o sucesso nas competições, mas também para impulsionar a aplicação dessas tecnologias em contextos práticos e inovadores.

REFERÊNCIAS

- [1] Filipe Honório Varaschim, Jefferson Wilhelm Meyer Soares, Felipe Augusto de Aguiar Possoli, Luiz Eduardo Pivovar, Ricardo Breganon e Uiliam Nelson Lenzion Tomaz Alves. "UTILIZAÇÃO DE UM FILTRO COMPLEMENTAR JUNTO AO SENSOR MPU 6050". Em: *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão* (ISSN: 2525-4782) 7.7 (2022).
- [2] JE Hirsch. "Spin hall effect". Em: *Physical review letters* 83.9 (1999), p. 1834.
- [3] B Andrei Bernevig e Shou-Cheng Zhang. "Quantum spin Hall effect". Em: *Physical review letters* 96.10 (2006), p. 106802.

AUTORES

Ewel Fernandes Pereira é graduando em Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e faz parte da equipe de Robótica Robotbulls, na qual é capitão da modalidade Sumô 3kg, há 3 anos.



Mayara do Prado Almeida é graduanda em Engenharia de Elétrica no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e faz parte da equipe de Robótica Robotbulls, na qual é integrante da modalidade Trekking, há 9 meses.



Tobias Bueno Pereira é graduando em Engenharia de Software no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) e faz parte da equipe de Robótica Robotbulls, na qual é capitão da modalidade Trekking, há 2 anos.



Estudo e aplicação de tecnologias para Drones Autônomos Indoor

Guilherme M. Virgulino, Sara E. de Souza, Samuel S. Oliveira, Wanderson E. Saldanha, Alexandre B. Lugli, Eugênio M. J. da Silva, Egídio R. Neto, Luiz Fernando D. Ribeiro dos Santos

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

guilherme.virgulino@geb.inatel.br, sara.ester@gea.inatel.br, samuel.oliveira@gea.inatel.br, wsaldanha@inatel.br, baratella@inatel.br, eugenio@inatel.br, egidio.neto@inatel.br, luizf.santos@inatel.br

Abstract—Autonomous drones have emerged as an innovative technology with various practical applications, including marking recognition, object identification, and cargo transportation.

This article addresses the development and application of these technologies, exploring their ability to perform complex tasks autonomously, both in technical and practical structure, and highlighting their advantages over traditional approaches.

Additionally, it discusses the latest advancements and technologies available for mapping controlled regions. By exploring the progress in this area, the aim is to provide a comprehensive overview of the tools and methods currently used for the capture and analysis of spatial data through autonomous drones, seeking to expand the knowledge of unmanned aircraft.

Index Terms—Indoor-Navigation, Visual-Processing, Mapping, Drone

Resumo—Os drones autônomos têm se destacado como uma tecnologia inovadora com diversas aplicações práticas, incluindo reconhecimento de marcações, identificação de objetos e transporte de carga.

Este artigo aborda o desenvolvimento e a aplicação dessas tecnologias, explorando sua capacidade de realizar tarefas complexas de forma autônoma, tanto em estrutura técnica quanto prática, e destacando suas vantagens em relação a abordagens tradicionais.

Além disso, discute as mais recentes novidades e tecnologias disponíveis para o mapeamento de regiões controladas. Ao explorar os avanços nesta área, pretende-se fornecer uma visão abrangente das ferramentas e métodos atualmente utilizados para a captura e análise de dados espaciais por meio de drones autônomos visando ampliar o conhecimento de aeronaves não controladas.

Palavras chave—Navegação-Indoor, Processamento-Visual, Mapeamento, Drone

I. INTRODUÇÃO

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) representam uma das tecnologias mais promissoras do século XXI, com aplicações que vão desde operações industriais até missões críticas de busca e salvamento. No contexto específico dos ambientes internos, esses sistemas enfrentam desafios técnicos particulares que demandam soluções especializadas em navegação autônoma, controle de voo e processamento sensorial.

A presente pesquisa surge como resposta a uma lacuna identificada na literatura científica atual, que carece de estudos abrangentes sobre a integração eficiente desses subsistemas em plataformas aéreas para operação em espaços confinados.

A relevância deste trabalho se manifesta em múltiplas dimensões. Do ponto de vista acadêmico, oferece contribuições metodológicas para o campo emergente da robótica aérea *indoor*, particularmente no que diz respeito à fusão de dados sensoriais e ao controle adaptativo em ambientes dinâmicos.

No âmbito mercadológico, os resultados obtidos possuem potencial aplicação em setores estratégicos como a logística

automatizada em armazéns, inspeção industrial em plantas fabris e operações de emergência em estruturas de difícil acesso.

Os sistemas VTOL (*Vertical Takeoff and Landing*) de configuração quadricóptera destacam-se como plataforma ideal para estas aplicações devido à sua combinação única de simplicidade mecânica e versatilidade operacional.

O princípio físico fundamental que rege sua operação baseia-se na geração diferencial de empuxo através da aceleração controlada de massas de ar pelas hélices. Este processo, quando analisado sob a ótica da mecânica dos fluidos computacional (CFD), revela complexas interações entre os campos de pressão dinâmica e os efeitos de borda característicos de ambientes confinados.

Estudos específicos na área [1], demonstram que o comportamento do fluxo aerodinâmico em tais condições pode ser modelado com precisão através das equações de Navier-Stokes, desde que devidamente adaptadas para considerar os efeitos de confinamento e turbulência induzida.

A configuração simétrica dos quadricópteros, com pares de motores contra-rotativos, proporciona não apenas a neutralização dos momentos giroscópicos indesejados, mas também um grau de redundância crítica para operações em ambientes de risco.

Como evidenciado por estudos [2], esta arquitetura permite o desenvolvimento de estratégias de controle robustas capazes de manter a estabilidade do veículo mesmo na presença de falhas parciais do sistema ou perturbações ambientais significativas.

Tais características tornam-se particularmente relevantes quando consideramos os desafios específicos da navegação *indoor*, onde os efeitos de parede, correntes de ar imprevisíveis e a proximidade com obstáculos impõem requisitos rigorosos aos sistemas de controle.

Neste contexto, a presente pesquisa avança o estado da arte ao propor uma abordagem integrada que combina técnicas avançadas de visão computacional com algoritmos de controle adaptativo, implementados em uma arquitetura de hardware distribuído otimizada para operação em tempo real.

Os resultados obtidos não apenas validam a viabilidade técnica de tais sistemas, mas também fornecem *insights* valiosos sobre os limites operacionais e requisitos de projeto para aplicações comerciais em larga escala. A metodologia desenvolvida e as lições aprendidas durante esta investigação contribuem significativamente para o corpo de conhecimento em robótica aérea, abrindo novas perspectivas para a aplicação prática dessas tecnologias em cenários do mundo real.

II. ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE

O sistema desenvolvido foi composto por componentes cuidadosamente selecionados com base em critérios técnicos e restrições orçamentárias. A arquitetura do drone combina elementos de controle, sensoriamento e processamento para operação autônoma em ambientes internos.

Como núcleo do sistema de controle, adotou-se a placa Pixhawk FMU V2, um controlador de voo que resolve o desafio complexo de integrar múltiplas variáveis dinâmicas. Em sistemas aéreos, fatores como ângulo de inclinação, variações de aceleração e nivelamento inicial criam um cenário operacional complexo.

Embora sensores individuais possam medir essas grandezas, sistemas distribuídos introduzem ruídos e latências que prejudicam o desempenho. A Pixhawk aborda esse problema através de processamento integrado de pacotes de dados no formato UORB[3], combinando leituras de seu giroscópio e acelerômetro embarcados com algoritmos de filtragem avançados no *firmware*. Esta solução foi selecionada por seu histórico comprovado em aplicações aeroespaciais e pela ampla base de suporte técnico disponível [4].

O sistema de alimentação utiliza baterias LiPo (*Lithium Polymer*) de múltiplas células, conhecidas por sua relação peso-potência favorável e características de descarga estável. Especificamente, foram empregadas unidades 3S(3 células) com capacidade de 11mAh(miliampere hora), capazes de fornecer tensão adequada por períodos prolongados sem comprometer a relação peso-potência do veículo.

A gestão energética é realizada por um módulo de potência dedicado, que regula a tensão da bateria e monitora o consumo através de sensores de corrente integrados, fornecendo dados essenciais para o gerenciamento energético pelo controlador PX4.

A distribuição de energia segue para uma placa de fibra de vidro que elimina a necessidade de fiação exposta, seguindo protocolos de segurança. O controle dos motores é realizado por ESCs (*Electronic Speed Controllers*) de 30A, que regulam precisamente a corrente fornecida aos motores *brushless*, de marca MULTISTAR 2212-920. Estes componentes foram selecionados por sua disponibilidade e características técnicas adequadas, permitindo o controle tridimensional através da modulação individual da velocidade de cada motor.

A estrutura física do drone baseia-se no *frame* S500, modificado com componentes impressos em 3D para acomodar dispositivos adicionais. Considerando os requisitos de segurança em ambientes com presença humana, o sistema incorpora múltiplas camadas de proteção.

O *firmware* inclui rotinas de desligamento emergencial para situações como perda de posicionamento, violação de limites operacionais ou falha de comunicação. Complementando esses mecanismos, um módulo de telemetria de 920MHz(Mega Hertz) permite o reestabelecimento manual do controle quando necessário.

Para navegação em ambientes internos, onde sistemas GPS são ineficazes, o drone emprega um sistema de visão computacional baseado na câmera Intel RealSense D435i, exemplificado na Figura 1. Este dispositivo combina sensores RGB e

de profundidade (RGB-D) com uma unidade de medição inercial integrada, fornecendo dados essenciais para estimativa de posição relativa. Seu *firmware* especializado e SDK(*Software Developer Kit*) dedicado simplificam a organização dos fluxos de dados em tópicos estruturados, facilitando a detecção e correção de erros.



Fig. 1. Foto exemplo da câmera RealSense D435i, mostrando da esquerda para direita: sensor infravermelho esquerdo (Infra1), lente RGB, projetor infravermelho para mapeamento de profundidade e sensor infravermelho direito (Infra2).

O processamento avançado é realizado por uma Jetson Nano da NVIDIA, selecionada por sua capacidade de aceleração GPU(*Graphic Processing Unit*) através da tecnologia CUDA e pelo *toolkit* JetPack[5], que otimiza a implementação de algoritmos de visão computacional. Esta configuração permite o processamento em tempo real dos fluxos de dados sensoriais, essencial para a operação autônoma em espaços confinados.

III. ROS2

O ROS (Robot Operating System) constitui um conjunto abrangente de bibliotecas, ferramentas e convenções de software projetadas para facilitar o desenvolvimento de sistemas robóticos complexos. Embora a denominação sugira um sistema operacional completo, trata-se na realidade de um *middleware* sofisticado que fornece serviços essenciais como abstração de hardware, gerenciamento distribuído de processos, comunicação entre processos e um sistema de empacotamento para distribuição de componentes de software [6].

A arquitetura modular do ROS permite a criação de sistemas distribuídos onde componentes especializados, denominados "nós", comunicam-se de forma eficiente através de mecanismos de publicação/assinatura em tópicos e serviços RPC (*Remote Procedure Call*). Como ilustrado na Figura 2, essa estrutura permite a organização hierárquica de fluxos de dados, facilitando o gerenciamento de informações sensoriais complexas, como as provenientes de sistemas de visão computacional.

A ubiquidade do ROS em sistemas de drones autônomos deve-se principalmente ao seu controle granular sobre fluxos de informação individuais e à capacidade de visualização da rede de comunicação através de grafos de nós (*node-graphs*). Esses grafos representam visualmente as relações de publicação/assinatura entre componentes, permitindo monitoramento e depuração eficientes do sistema como um todo.

Para esta pesquisa, adotou-se especificamente o ROS 2, que representa uma evolução significativa do framework original, oferecendo melhorias críticas em escalabilidade, desempenho em tempo real e interoperabilidade com sistemas industriais. A arquitetura do ROS 2 baseia-se no padrão DDS (*Data Distribution Service*) para comunicação entre processos, proporci-

```
eluno@irobo-049368nb: $ ros2 topic list
/camera/camera/accel/imu_info
/camera/camera/accel/metadata
/camera/camera/accel/sample
/camera/camera/color/camera_info
/camera/camera/color/image_raw
/camera/camera/color/metadata
/camera/camera/depth/camera_info
/camera/camera/depth/image_rect_raw
/camera/camera/depth/metadata
/camera/camera/extrinsics/depth_to_accel
/camera/camera/extrinsics/depth_to_color
/camera/camera/extrinsics/depth_to_gyro
/camera/camera/extrinsics/depth_to_infra1
/camera/camera/extrinsics/depth_to_infra2
/camera/camera/gyro/imu_info
/camera/camera/gyro/metadata
/camera/camera/gyro/sample
/camera/camera/imu
/camera/camera/infra1/camera_info
/camera/camera/infra1/image_rect_raw
/camera/camera/infra1/metadata
/camera/camera/infra2/camera_info
/camera/camera/infra2/image_rect_raw
/camera/camera/infra2/metadata
/camera/imu
/cloud_ground
/cloud_obstacles
/diagnostics
/elevation_map
/global_path
/global_path_nodes
/global_pose
/goal
/goal_node
/goal_out
/goal_reached
/gps/flx
/grtd_prob_map
/imu/data
/imu/info
/initialpose
/labels
/landmark_detection
/landmark_detections
/landmarks
/local_grtd_empty
/local_grtd_ground
/local_grtd_obstacle
/local_path
/local_path_nodes
/localization_pose
/map
/mapData
/mapGraph
```

Fig. 2. Estrutura de tópicos ROS para processamento de dados de câmera em tempo real, demonstrando a organização hierárquica dos fluxos de informação para diferentes módulos de processamento. Autoria própria

onando controle preciso sobre QoS (qualidades de serviço) e mecanismos de descoberta distribuída.

Um aspecto particularmente relevante para sistemas embarcados é a integração com ambientes com restrições de recursos através da ponte UXRCE (*eXtremely Resource-Constrained Environments*), que permite a comunicação eficiente entre o computador de bordo e microcontroladores de baixo poder computacional [7]. Essa capacidade foi essencial para o desenvolvimento do sistema proposto, permitindo a otimização do fluxo de dados entre os diversos componentes do drone.

IV. VSLAM PARA NAVEGAÇÃO EM AMBIENTES INTERNOS

O *Visual Simultaneous Localization and Mapping* (VSLAM) representa uma técnica fundamental em robótica autônoma, permitindo a estimação em tempo real da posição de um veículo enquanto constrói simultaneamente um mapa tridimensional do ambiente. Em aplicações de drones para espaços internos, onde sistemas de posicionamento global são ineficazes, o VSLAM baseado em visão computacional emerge como solução técnica essencial.

O sistema implementado nesta pesquisa utiliza como sensor primário a câmera Intel RealSense D435i, que fornece fluxos sincronizados de imagens RGB e dados de profundidade. O processo de VSLAM inicia-se com a extração de características visuais significativas do ambiente, particularmente através da

identificação de pontos-chave invariantes entre quadros consecutivos. Esses *features* são então rastreados temporalmente para estimar o movimento relativo do drone, enquanto servem como base para a reconstrução geométrica do espaço.

A implementação adotada baseia-se no algoritmo RTAB-Map (*Real-Time Appearance-Based Mapping*), otimizado para execução na plataforma NVIDIA Jetson Nano através da tecnologia CUDA. Como demonstrado por [8], esta abordagem aproveita eficientemente a capacidade de processamento paralelo da GPU para acelerar as operações de correspondência de características e otimização de pose, reduzindo significativamente a latência do sistema.

A arquitetura do sistema segue um modelo cliente-servidor integrado com a pilha de controle PX4. O nó UXRCE-DDS atua como interface de comunicação entre a Jetson Nano e o controlador de voo, enquanto um subsistema dedicado processa os tópicos de *Visual Inertial Odometry* publicados via uORB. O RTAB-Map, configurado como nó ROS2 independente, consome os fluxos de imagem da RealSense D435i, gerando estimativas de pose refinadas que são enviadas ao tópico `/fmu/in/vehiclevisualodometry`.

Um desafio crítico nesta integração é a sincronização temporal entre os dados de odometria visual e as medições inerciais. O parâmetro `EKF_EV2(EKF2_EV_DELAY)` no firmware PX4 deve ser ajustado para compensar especificamente a latência do pipeline visual, garantindo a fusão adequada dos diferentes fluxos sensoriais no filtro de Kalman estendido (EKF2). [9]

Esta calibração temporal é essencial para manter a precisão da navegação em ambientes dinâmicos. A taxa de atualização visual foi estabelecida em 30 Hz, utilizando uma resolução de 640×480 pixels para o fluxo RGB e 424×240 pixels para os dados de profundidade.

Dessa forma, o parâmetro de temporização `EKF_EV2`, crítico para a sincronização sensorial, foi ajustado para 50 milissegundos. Para o vocabulário visual do sistema de extração de características, adotou-se um conjunto de 10.000 *features*, balanceando precisão e desempenho computacional. [10]

Esta configuração específica foi determinada experimentalmente para otimizar o equilíbrio entre precisão de mapeamento e eficiência computacional, considerando as capacidades da plataforma embarcada Jetson Nano e os requisitos de navegação em tempo real.

A. Estrutura de Emissão de Missões

Devido à complexidade computacional inerente aos processos de navegação autônoma em ambientes internos e à carga significativa imposta à unidade de processamento Jetson Nano, o sistema adotou uma arquitetura distribuída para planejamento e execução de missões. Neste esquema, as rotinas de alto nível são geradas externamente em uma estação de solo baseada em um computador *ThinkPad*, que comunica-se com o drone via enlace de telemetria.

A implementação atual utiliza um protocolo de comunicação baseado em MAVLink, empregando para este fim a biblioteca MAVSDK-Python, uma evolução moderna de *frameworks* anteriores como o DroneKit, com uso não incomum a outros formatos de explorar tecnologias semelhantes. [11]

V. TESTES E RESULTADOS

Os testes experimentais foram conduzidos em um armazém semi-aberto com o objetivo principal de validar o desempenho do sistema de navegação autônoma baseado em VSLAM em condições reais de operação. O drone executou com sucesso a sequência básica de decolagem vertical até 2 metros de altitude, mantendo-se estável nesta posição por períodos de até 5 minutos. Durante os testes, o sistema de visão computacional demonstrou capacidade eficiente na detecção de pontos característicos, com média de 120-130 *features* rastreadas por quadro a uma taxa estável de 28-30Hz, permitindo a estimativa contínua da posição relativa.

Entretanto, observou-se que limitações computacionais da plataforma Jetson Nano impactaram negativamente a estabilidade posicional, resultando em oscilações médias de 12cm no plano horizontal e 9cm no eixo vertical. Essas variações mostraram correlação direta com picos de carga da CPU (*Center Processing unit*), quando a utilização excedia 85%, causando atrasos de até 112ms no pipeline de processamento visual. Apesar dessas limitações, o sistema conseguiu manter operação segura sem ocorrência de colisões, comprovando a viabilidade básica da abordagem, mas indicando a necessidade de otimizações no balanceamento de carga computacional e implementação de filtros preditivos para compensar as latências identificadas.

Embora os testes tenham demonstrado capacidade básica de manter a posição estática em condições controladas, a análise revela que desvios temporais no processamento visual (latências de 80-112 ms) criam efeitos cumulativos que comprometeriam a operação em ambientes mais complexos.

O uso de tecnologias mais avançadas, como um computador de bordo mais potente, apresenta-se como uma das possíveis formas de resolução dos problemas apresentados, e potencializador de introdução de mais conteúdo de missões no manejo de memória remanescente, abrindo precedentes a uma total exclusão de um *Thinkpad* auxiliar.

VI. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

As tecnologias de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) e controle de erro têm se tornado fundamentais na implementação de sistemas robóticos para aplicações cotidianas. Diversas ferramentas surgem como soluções abertas no mercado, incluindo o Isaac-ROS-VSLAM, desenvolvido pela NVIDIA para plataformas avançadas como Jetson Orin e Xavier, ainda que seu uso seja limitado em modelos mais antigos como a Jetson Nano.

Nesta pesquisa, utilizou-se o método VIO (*Visual-Inertial Odometry*) para localização em tempo real. No entanto, outras abordagens ainda não exploradas em profundidade podem ser candidatas para aplicações futuras. Uma dessas alternativas é o DSO (*Direct Sparse Odometry*), que utiliza um modelo probabilístico para mensurar a espasticidade dos pontos no mapa, em vez de reconhecer apenas pontos notáveis [12].

Essa técnica é promissora para localização em ambientes abertos e sem acesso ao sinal GPS. Outra solução relevante é o CUDA-*accelerated* ORB-SLAM, uma versão otimizada do ORB-SLAM que aproveita o poder computacional de GPUs

NVIDIA para acelerar o processamento e a identificação de pontos característicos no mapa [13][14].

Essas tecnologias, com abordagens distintas, oferecem soluções diversificadas para navegação autônoma e mapeamento em tempo real, destacando-se em aplicações que exigem alto desempenho, precisão e robustez. Essas inovações abrem caminho para aplicações em entregas autônomas, inspeções industriais e mapeamento agrícola, além de operações em locais desafiadores.

A integração com redes de comunicação, como 5G, promete maior eficiência na gestão de frotas e controle remoto. Apesar dos desafios regulatórios e de acessibilidade, essas tecnologias têm potencial para transformar o uso comercial de drones, tornando-os ferramentas essenciais em diversos setores.

REFERÊNCIAS

- [1] Nicolas Lima Oliveira. “Simulação em dinâmica dos fluidos computacional de hélices”. Em: (2019).
- [2] Y Eraslan, E Özen e Tuğrul Oktay. “A literature review on determination of quadrotor unmanned aerial vehicles propeller thrust and power coefficients”. Em: *Ejona X-International Conference on Mathematics-Engineering-Natural & Medical Sciences*. 2020, pp. 1–12.
- [3] Simone D’Angelo, Francesca Pagano, Francesco Longobardi, Fabio Ruggiero e Vincenzo Lippiello. “Efficient development of model-based controllers in px4 firmware: A template-based customization approach”. Em: *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE. 2024, pp. 1155–1162.
- [4] PX4 Community. *PX4 Discussion Forum*. URL: <https://discuss.px4.io/>.
- [5] Fatma Nur Uzun, Mehmet Kayrici e Beyzanur Akkuzu. “Nvidia jetson nano development kit”. Em: *Programmable Smart Microcontroller Cards* (2021), p. 82.
- [6] Steven Macenski, Tully Foote, Brian Gerkey, Chris Lallancette e William Woodall. “Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild”. Em: *Science robotics* 7.66 (2022), eabm6074.
- [7] Thomas Witte e Matthias Tichy. “Checking consistency of robot software architectures in ROS”. Em: *Proceedings of the 1st International Workshop on Robotics Software Engineering*. 2018, pp. 1–8.
- [8] Jincheng Li, Guoqing Deng, Wen Zhang, Chaofan Zhang, Fan Wang e Yong Liu. “Realization of CUDA-based real-time multi-camera visual SLAM in embedded systems”. Em: *Journal of Real-Time Image Processing* 17 (2020), pp. 713–727.
- [9] Keisuke Fujii. “Extended kalman filter”. Em: *Reference Manual* 14 (2013), p. 41.
- [10] Min Sung Ahn, Hosik Chae, Donghun Noh, Hyunwoo Nam e Dennis Hong. “Analysis and noise modeling of the intel realsense d435 for mobile robots”. Em: *2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*. IEEE. 2019, pp. 707–711.

- [11] Umut Can Cabuk, Mustafa Tosun, Orhan Dagdeviren e Yusuf Ozturk. “An Architectural Design for Autonomous and Networked Drones”. Em: *MILCOM 2022-2022 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. IEEE. 2022, pp. 962–967.
- [12] Jakob Engel, Vladlen Koltun e Daniel Cremers. “Direct sparse odometry”. Em: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 40.3 (2017), pp. 611–625.
- [13] Donald Bourque. “CUDA-Accelerated Visual SLAM For UAVs”. Em: *WORCESTER Polytech. Inst* (2017), p. 35.
- [14] Filippo Muzzini, Nicola Capodieci, Roberto Cavicchioli e Benjamin Rouxel. “Brief announcement: Optimized gpu-accelerated feature extraction for orb-slam systems”. Em: *Proceedings of the 35th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures*. 2023, pp. 299–302.

AUTORES

Guilherme Moreira Virgulino é graduando em Engenharia Biomédica pelo INATEL - Instituto Nacional de Telecomunicações . Bolsista de Iniciação Científica no Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do INATEL - RobotBulls, onde atua na categoria de drones autônomos e rádio controlados.É também tesoureiro do capítulo da OSA



OPTICA pela mesma instituição.Tem interesse em Robótica, Inteligência Artificial, Próteses, Nanotecnologia e Órgãos Artificiais.

Sara Ester de Souza é graduanda em Engenharia de Controle e Automação no Inatel.Voluntária no Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do INATEL - Robotbulls,onde atua na categoria de drones autônomos e rádio controlados.Possui interesse em Sistemas autônomos e aplicações IOT.



Samuel Oliveira é graduando em Engenharia de Controle e Automação no Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL. Bolsista de Iniciação Científica no Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do INATEL - RobotBulls, onde atua na categoria de drones autônomos e rádio controlados. Tem interesse nas áreas de Robótica, Automação Industrial e Inteligência Artificial.

