

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Contribuições para a Camada Física de Redes 6G



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	20/12/2021	Daniely Gomes Silva Diego Gabriel Soares Pivoto Gustavo Rodrigues de Lima Tejerina Juliano Silveira Ferreira Luciano Leonel Mendes Mariana Baracat de Mello Matheus Sêda Borsato Cunha Michelle Soares Pereira Facina Roberto Michio Marques Kagami Samuel Baraldi Mafra Tibério Tavares Rezende Victoria Souto	Elaboração do conteúdo
2	03/02/2022	Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Acrônimos

- 3GPP** *3rd Generation Partnership Project*
- 6G** *Sexta Geração*
- 6LoWPAN** *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks*
- ACLR** *Adjacent Channel Leakage Power Ratio*
- ACM** *Adaptive Coding Modulation*
- AGM** *Arithmetic-Geometric Mean*
- AIC** *Akaike Information Criterion*
- AWGN** *Additive White Gaussian Noise*
- BER** *Bit Error Rate*
- BLER** *Block Error Rate*
- BPSK** *Binary Phase-Shift Keying*
- CF-CPSC** *Circular Folding Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation*
- CP** *Cyclic Prefix*
- CPS** *Cyber-Physical Systems*
- CPSC** *Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation*
- CRR** *Centro de Referência em Radiocomunicações*
- CSI** *Channel State Information*
- CSS** *Cooperative Spectrum Sensing*
- DNN** *Deep Neural Network*
- ECA** *Error Correction Amplitude*
- eMBB** *enhanced Mobile Broadband*
- FC** *Fusion Centre*
- FDE** *Frequency-Domain Equalization*
- FEC** *Forward Error Correction*
- FIoTE3** *IoT do Futuro*
- FTN** *Faster-than-Nyquist*
- FIA** *Future Internet Architecture*
- GFDM** *Generalized Frequency Division Multiplexing*
- GID** *Gini Index Dectector*
- GLRT** *Generalized Likelihood Ratio Test*
- GPP** *General Purpose Processor*
- H-OMA** *Heterogeneous Orthogonal Multiple Access*
- HMA** *Hybrid Multiple Access*
- H-NOMA** *Heterogeneous Non-Orthogonal Multiple Access*

HR Hadamard *Ratio*
I4.0 Indústria 4.0
IA Inteligência Artificial
IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IIoT *Industrial Internet-of-Things*
IoT *Internet-of-Things*
IPC *Inter-Process Communication*
IPv6 *Internet Protocol version 6*
IRS *Intelligent Reflective Surface*
ITU International Telecommunication Union
KS Kolmogorov-Smirnov
LDPC *Low Density Check Parity Code*
LEO *Low Earth Orbit*
LIS *Large Intelligent Surface*
LLR *Logarithmic Likelihood Ratio*
LoRa *Long Range*
LoS *Line-of-Sight*
LS *Least Squares*
LTE *Long Term Evolution*
MAC *Medium Access Control*
MCA Matriz de Covariância das Amostras
MCS *Modulation Coding Scheme*
ML *Machine Learning*
MIMO *Multiple-Input Multiple-Output*
MLSE *Maximum Likelihood Sequence Estimation*
MMD *Max-Matching Diversity*
MMED *Maximum-Minimum eigenvalue detector*
mMIMO *massive MIMO*
MPSK *M-ary Phase-Shift Keying*
mMTC *Massive Machine-Type Communications*
MRT *Maximum Ratio Transmission*
MSE *Mean Square Error*
MUSA *Multi-User Shared Access*
NLoS *Non-Line-of-Sight*
NMSE *Normalized Mean Square Error*

NOMA *Non-Orthogonal Multiple Access*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OMA *Orthogonal Multiple Access*

PDS *Processamento Digital de Sinais*

PHY *Physical layer*

POSIX *Portable Operating System Interface*

PSK *Phase-Shift Keying*

PSO *Particle Swarm Optimization*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*

QoS *Quality of Service*

QPSK *Quadrature Phase-Shift Keying*

RaaS *Resource as a Service*

RAN *Radio Access Network*

RF *Radio Frequency*

RIS *Reflective Intelligent Surface*

RL *Reinforcement Learning*

RSMA *Rate-Splitting Multiple Access*

SD *Sphere Detector*

SDR *Software-Defined Radio*

SER *Symbol Error Rate*

SIC *Successive Interference Cancellation*

SINR *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*

SISO *Single-Input Single-Output*

SNR *Signal-to-Noise Ratio*

SSSgbKSE *Successive Symbol-by-Symbol with go-back K Sequence Estimator*

SSSSE *Successive Symbol-by-Symbol Sequence Estimator*

TVWS *TV White Space*

UDP *User Datagram Protocol*

UDN *Ultra Dense Networks*

UHD *Universal Software Radio Peripheral Hardware Driver*

UHF *Ultra High Frequency*

URLLC *Ultra Reliable Low Latency Communications*

USRp *Universal Software Radio Peripheral*

V2V *Vehicular-to-Vehicular*

V2I *Vehicular-to-Infrastructure*

VD *Volume-based Detector*

VLC *Visible Light Communication*

WCF-CPSC *Weighted CF-CPSC*

XDP *eXpressive Datagram Protocol*

XIA *eXpressive Internet Architecture*

XIP *eXpressive Internet Protocol*

Lista de Figuras

1	Variação do parâmetro μ na análise de: (a) taxa de cruzamento de nível, (b) duração média de desvanecimento, (c) coeficiente de correlação, (d) coeficiente de autocorrelação, (e) densidade espectral de potência e (f) probabilidade média de erro de bit.	3
2	Função densidade de probabilidade da fase: (a) $\eta = 0,1$ e $\mu = 1,25$, (b) $\eta = 0,5$ e $\mu = 1,25$, e (c) caso Hoyt com $b = 1/3$	4
3	Estimativas obtidas operando em 28 GHz para a função densidade de probabilidade de diferentes modelos de desvanecimento.	5
4	Estimativas obtidas operando em 28 GHz para a função acumulada de probabilidade de diferentes modelos de desvanecimento.	6
5	Cenários de comunicações V2V (esquerda) e V2I (direita).	9
6	Probabilidade de interrupção de sigilo em função da SNR instantânea de transmissão variando o número de elementos refletores da RIS para o cenário V2V.	10
7	Probabilidade de interrupção de sigilo em função do número de elementos refletores da RIS para o cenário V2I.	11
8	Modelo do sistema de comunicação <i>wireless</i> auxiliado por LIS.	11
9	Modelo do sistema com entrada e saída únicas.	12
10	Probabilidade exata de erro de bit para $n = 2$	12
11	Modelo do sistema MIMO auxiliado por LIS.	13
12	Divergência de Kullback–Leibler para $ h ^2$	14
13	Modelo do sistema com um bisbilhoteiro.	15
14	Probabilidade de erro de bit quando há variação da SNR.	15
15	Dispositivo móvel adaptado ao equino, bicicleta e carro.	17
16	Ajuste de curva exponencial aos dados.	17
17	Esquema proposto com a função MSE modificada e rede neural profunda.	18
18	Resposta da função proposta.	18
19	Análise da taxa de dados para <i>enhanced Mobile Broadband</i> (eMBB) e <i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i> (URLLC) com $\epsilon_B = 10^{-3}$, $\epsilon_U = 10^{-5}$, $S = 5$, $a_U = 0.1$ e $F = 10$	20
20	Análise da potência transmitida na estação rádio base com relação a distância entre estação rádio base e terminal móvel considerando o número de elementos na IRS igual a 20.	21
21	Análise da sobrecarga de treinamento para uma distância de 50 metros entre a estação rádio base e o terminal móvel.	21
22	Configuração do sistema e representação das distâncias entre usuários, estação rádio base e IRS.	22
23	Análise da taxa de dados considerando $N \in \{60, 100\}$ e $(x_u = 10, y_u = 0)$ m e $(x_b = 15, y_b = 0)$ m.	23
24	Topologia do modelo de sistema: $K = 5$ satélites com diferentes probabilidades de eliminação ε para um espaçamento de $s = 4$ posições entre satélites consecutivos. A imagem corresponde à posição 17 th do Sat_1	24
25	Taxa de transferência geral alcançada com distribuição de carga de tráfego uniforme e não uniforme $G_T = 180$ vs o número de satélites K no sistema	24
26	Taxa de perda de pacotes \mathcal{P} vs Carga do canal G para $K = 2$ satélites e diferentes pares de probabilidades de eliminação $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$, no caso de baixa carga do canal.	25

27	Taxa de transferência alcançada com distribuição de carga de tráfego uniforme e não uniforme $G_T = 180$ vs número de satélites K no sistema.	25
28	Análise da taxa de dados no URLLC e eMBB para os <i>Orthogonal Multiple Access</i> (OMA) e <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> (NOMA) e considerando o URLLC sobre os esquemas U-OMA, U-NOMA, e U-RSMA. $\bar{\Gamma}_U = 20$ dB, $\bar{\Gamma}_B = 10$ dB, $\epsilon_U^{U-OMA} = 10^{-5}$, $\epsilon_U^{U-NOMA} = \epsilon_U^{U-RSMA} = 5 \times 10^{-6}$, $\epsilon_B = 10^{-3}$, $a_U = 1$, $F = 8$, $S = 5$, $n_U = 2$ e α otimizado.	27
29	Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação <i>online</i> , sob diferentes ajustes no número de camadas ocultas.	28
30	Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação <i>online</i> , sob diferentes ajustes no número de neurônios por camada oculta.	28
31	Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação <i>online</i> , sob diferentes ajustes na taxa de aprendizagem.	29
32	Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação <i>online</i> , sob diferentes arquiteturas de DNN.	29
33	Esquema de uma rede cooperativa V2V-VLC com um veículo retransmissor intermediário	33
34	Esquema de comunicação para dois carros usando V2V-VLC ao longo de uma curva.	33
35	Taxa de erro de bit e θ_d em função da posição do veículo fonte ao longo do cenário para a comunicação V2V-VLC entre S e D	34
36	Esquema da comunicação cooperativa ao longo de uma via curvilínea. D é considerado fixo em diferentes posições angulares, enquanto R segue o caminho traço-ponto entre S e D	34
37	Taxa de erro de bit cooperativa em função da distância entre os veículos fonte e retransmissor para diferentes valores de ângulos θ_d	34
38	Rede 5G-IoT piloto: diagrama em blocos do sistema de aplicações IoT para o agronegócio.	36
39	Emissão fora da faixa de interesse para as formas de onda GFDM e OFDM.	37
40	Demonstração da alocação dinâmica de TVWS.	38
41	Estação rádio base e terminal de usuário empregados na demonstração da rede 5G-IoT.	38
42	Diagrama de blocos das camadas principais do transceptor ponto a ponto.	38
43	Diagrama de blocos das camadas principais do transceptor multiusuário.	40
44	Taxa de comunicação do MAC com execução simultânea do GNU Radio.	42
45	Diagrama de comunicação IPC POSIX.	43
46	Espectro de <i>uplink</i> para diferentes configurações de limite máximo de alocação de recursos.	44
47	Inserção de informação de controle de fluxo na camada PHY.	45
48	<i>Set-up</i> de testes.	46
49	Medida de taxa de <i>downlink</i> da versão otimizada do transceptor.	47
50	Medida de taxa de <i>uplink</i> da versão otimizada do transceptor.	47
51	Medida de latência da versão otimizada do transceptor.	47
52	Velocidade de acesso à Internet a partir do terminal do usuário.	48
53	Acesso a um <i>streaming</i> de vídeo a partir do terminal do usuário.	49
54	Compartilhamento de espectro de <i>uplink</i> entre dois terminais de usuário.	50
55	Comunicação da estação rádio base com dois terminais de usuário.	50

56	Monitoração de região prévia à ocorrência de erros.	52
57	Modelo com uso de <i>Polar Code</i> implementado no transceptor.	52
58	Decisão direta com aprendizado de reforço.	54
59	Decisão indireta com conformação de índice.	54
60	Decisão indireta com coeficientes de atingimento de meta.	55
61	Matriz de recompensas: MCS 21 de 20dB a 28 dB.	56
62	Resposta utilizando <i>Q-Learning</i> com ECA em função da SNR	56
63	Subestimação de SNR = 0.5 dB.	57
64	Exemplo de implementação utilizando <i>Deep Q-Learning</i>	58

Sumário

1	Introdução	1
2	Contribuições dos Artigos	2
2.1	<i>The μ Process Type I</i>	2
2.2	<i>A New Look at the η-μ Fading Model</i>	2
2.3	<i>Error Probability of M-Phase Signaling With Phase Noise Over Fading Channels</i>	3
2.4	<i>Fading Evaluation in Standardized 5G Millimeter-Wave Band</i>	4
2.5	<i>Performance-traffic-trade-off of two novel hard decision and two soft decision fusion periodogram-based algorithms for cooperative spectrum sensing under unreliable reporting channel</i>	6
2.6	<i>Weighted Circular Folding Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation Algorithm</i>	7
2.7	<i>Pietra-Ricci Index Detector for Centralized Data Fusion Cooperative Spectrum Sensing</i>	8
2.8	<i>Design Guidelines for Database-Driven Internet of Things-Enabled Dynamic Spectrum Access</i>	8
2.9	<i>Secure Vehicular Communications through Reconfigurable Intelligent Surfaces</i>	9
2.10	<i>Large Intelligent Surfaces With Discrete Set of Phase-Shifts Communicating Through Double-Rayleigh Fading Channels</i>	10
2.11	<i>Bit Error Probability for Large Intelligent Surfaces Under Double-Nakagami Fading Channels</i>	12
2.12	<i>Large Intelligent Surfaces Communicating Through Massive MIMO Rayleigh Fading Channels</i>	13
2.13	<i>Secrecy Analysis and Error Probability of LIS-aided Communication Systems under Nakagami-m Fading</i>	14
2.14	<i>Comunicação LoRa na Zona Rural: Análise Baseada em uma Campanha de Medição no Noroeste Paulista</i>	16
2.15	<i>A Low-Complexity Deep Neural Network for Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio Estimation</i>	16
2.16	<i>Hybrid Multiple Access for Channel Allocation-Aided eMBB and URLLC Slicing in 5G and Beyond Systems</i>	19
2.17	<i>Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surfaces without CSI</i>	19
2.18	<i>IRS-Aided Physical Layer Network Slicing for URLLC and eMBB</i>	22
2.19	<i>Direct-to-Satellite IoT Slotted Aloha Systems with Multiple Satellites and Unequal Erasure Probabilities</i>	23
2.20	<i>Rate-Splitting Multiple Access for URLLC Uplink in Physical Layer Network Slicing with eMBB</i>	25
2.21	<i>Deep Neural Network Parameterization for Channel Estimation in MUSA Systems</i>	26
2.22	<i>Low-Complexity Detectors Applied to FTN-GFDM Systems</i>	29
2.23	<i>Blockchain Applied to Vehicular Odometers</i>	30
2.24	<i>Towards Future Internet of Things Experimentation and Evaluation</i>	31
2.25	<i>Cyber-Physical Systems Architectures for Industrial Internet of Things</i>	32
2.26	<i>Cooperative Full-Duplex V2V-VLC in Rectilinear and Curved Roadway Scenarios</i>	32

3	Contribuições do Transceptor	35
3.1	Evolução do Transceptor	35
3.2	Otimizações do Transceptor Multiusuário	39
3.2.1	Otimizações da Camada MAC	40
3.2.2	Otimizações da Camada IPC	43
3.2.3	Otimizações da Camada PHY	43
3.2.4	Resultados de Medidas e Testes Práticos	45
3.3	Desenvolvimentos Relativos à Inteligência Artificial	50
3.3.1	Aplicação do Índice de Amplitude de Correção	51
3.3.2	Definição da Topologia, Parâmetros e Algoritmos de Aprendizado de Máquina	53
3.3.3	Decisão Direta com RL	55
3.3.4	Decisão Indireta e Considerações sobre o Uso de <i>Deep Q-Learning</i>	58
3.4	Atualização da Plataforma	58
4	Conclusão	60

1 Introdução

As diversas famílias de casos de uso que estão sendo propostas para a Sexta Geração (6G) de Redes Móveis [1] irão impor requisitos contrastantes para todas as camadas da futura rede de comunicação móvel. O atendimento segmentado por alta vazão, baixa latência e múltiplas conexões não será suficiente para viabilizar as aplicações inovadoras previstas para 2030. É evidente que o sistema de comunicação das redes 6G terá que ser extremamente flexível e eficiente para poder cobrir esses requisitos.

Diversas tecnologias de comunicação estão sendo propostas para endereçar esses desafios [2, 3], como o uso de frequências nas bandas de sub-THz e THz, superfícies inteligentes, sistemas com múltiplas portadoras não ortogonais, múltiplo acesso não ortogonal, integração de sistemas ópticos e sem fio, entre outras tecnologias disruptivas. Dentre as diversas inovações, o uso de Inteligência Artificial (IA) [4] se destaca em redes 6G, uma vez que algoritmos inteligentes irão permear diversas camadas das redes de próxima geração. No entanto, diversos desafios ainda se mantêm sem uma solução tecnológica viável, abrindo espaço para várias frentes de pesquisa. Resultados de pesquisa nas áreas de metamateriais, microeletrônica para sistemas fotônicos, IA aplicada em Internet das Coisas, sensoriamento espectral, modelos de canais, comunicação veicular, superfícies inteligentes, utilização de IA em algoritmos de detecção, arranjos de antenas, novas topologias de redes, entre outras, foram alcançados pela equipe executora do projeto Brasil 6G, mostrando que o país vem contribuindo sistematicamente com o desenvolvimento científico e tecnológico das redes móveis. Além disso, os pesquisadores envolvidos com a execução do projeto estão inovando no processo de implementação de soluções voltadas para as camadas física e de enlace da *Radio Access Network* (RAN). Essa inovação consiste no desenvolvimento de uma plataforma baseada em rádio definido por software que é capaz de executar os algoritmos que compõem a RAN em tempo real. Diversos blocos desenvolvidos empregando linguagem de programação de alta eficiência foram integrados e aprimorados para serem executados nesta plataforma, que permite a análise de desempenho dessas propostas em condições reais de operação.

Assim, o objetivo deste relatório consiste em apresentar os principais avanços obtidos pelos pesquisadores do projeto Brasil 6G na área de telecomunicações, além de reportar os avanços na implementação de uma RAN inovadora sobre a plataforma de rádio definido por software. Este relatório está organizado em duas partes principais, sendo que a Seção 2 apresenta as principais contribuições científicas geradas pelos pesquisadores do projeto Brasil 6G, enquanto que a Seção 3 traz os avanços obtidos na implementação da RAN sobre a plataforma de rádio definido por software. Finalmente, a Seção 4 reúne as considerações finais e as conclusões deste relatório de pesquisa.

2 Contribuições dos Artigos

Os diversos desafios enfrentados pela camada de comunicação das redes 6G demandam contribuições multidisciplinares que permeiam por diversas áreas de pesquisa. O objetivo desta seção consiste em descrever as principais contribuições geradas pelos pesquisadores do projeto Brasil 6G que podem beneficiar as futuras redes móveis e ajudar no atendimento dos requisitos das aplicações consideradas estratégicas para o Brasil. As subseções a seguir resumizam essas contribuições.

2.1 *The μ Process Type I*

As redes 6G irão empregar um grande número de frequências distintas para viabilizar as futuras aplicações. Os modelos de canais utilizados para avaliar o desempenho dos enlaces de comunicação precisam ser flexíveis para se adequarem a estes diferentes cenários. Tendo este desafio em vista, os pesquisadores do projeto Brasil 6G estão desenvolvendo novos modelos de canais que podem ser parametrizados para melhor representar o comportamento dos canais sem fio em redes 6G.

O estudo proposto pelos pesquisadores do projeto em [5] foi desenvolvido para analisar as estatísticas do processo quadratura μ Tipo I. Este processo é definido matematicamente como a soma de μ processos gaussianos de média zero. Em sistemas de comunicação sem fio, o processo μ Tipo I é comumente utilizado para obter o sinal complexo de modelos de desvanecimento caracterizados pelo efeito de *clusters* de multipercurso, tais como Nakagami- m , α - μ e η - μ . Identificado pelo parâmetro μ , o efeito de clusterização é um fenômeno de desvanecimento frequentemente observado em sinais sem fio, o que torna essencial a sua caracterização. Além disso, os pesquisadores do projeto Brasil 6G conjecturaram que este processo poderá ser empregado para avaliar cenários de comunicação via rede elétrica.

Sendo assim, os pesquisadores do projeto Brasil 6G desenvolveram para o processo μ Tipo I as seguintes estatísticas: (i) momentos e função acumulativa de probabilidade das estatísticas marginais; (ii) função densidade de probabilidade bivariada; (iii) função densidade de probabilidade conjunta da variável e de sua derivação no tempo; (iv) taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento; (v) coeficiente de correlação; (vi) função de autocorrelação; (vii) função de densidade espectral de potência e ; (viii) probabilidade de erro de bit em transmissões de dados via rede elétrica. A Figura 1 ilustra o comportamento do processo μ Tipo I para algumas das estatísticas obtidas diante da variação do parâmetro μ . A definição destas formulações permitirá, em estudos futuros, obter uma melhor caracterização de canais com ou sem fio na presença de desvanecimento.

2.2 *A New Look at the η - μ Fading Model*

As interações entre o sinal de rádio e o ambiente resultam nos fenômenos de difração, espalhamento, reflexão e absorção. A influência destes fenômenos impossibilita caracterizar o comportamento exato do canal sem fio. Desta forma, o desenvolvimento de modelos estatísticos são essenciais para auxiliar na descrição da aleatoriedade do sinal de rádio. Neste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G investigaram em [6] o modelo de desvanecimento generalizado η - μ e apresentaram um novo formato que parametriza a correlação (η_1) e o desbalanceamento de potência (η_2) entre os processos em fase e quadratura. Este procedimento foi apenas possível com os resultados obtidos no processo quadratura μ Tipo I.

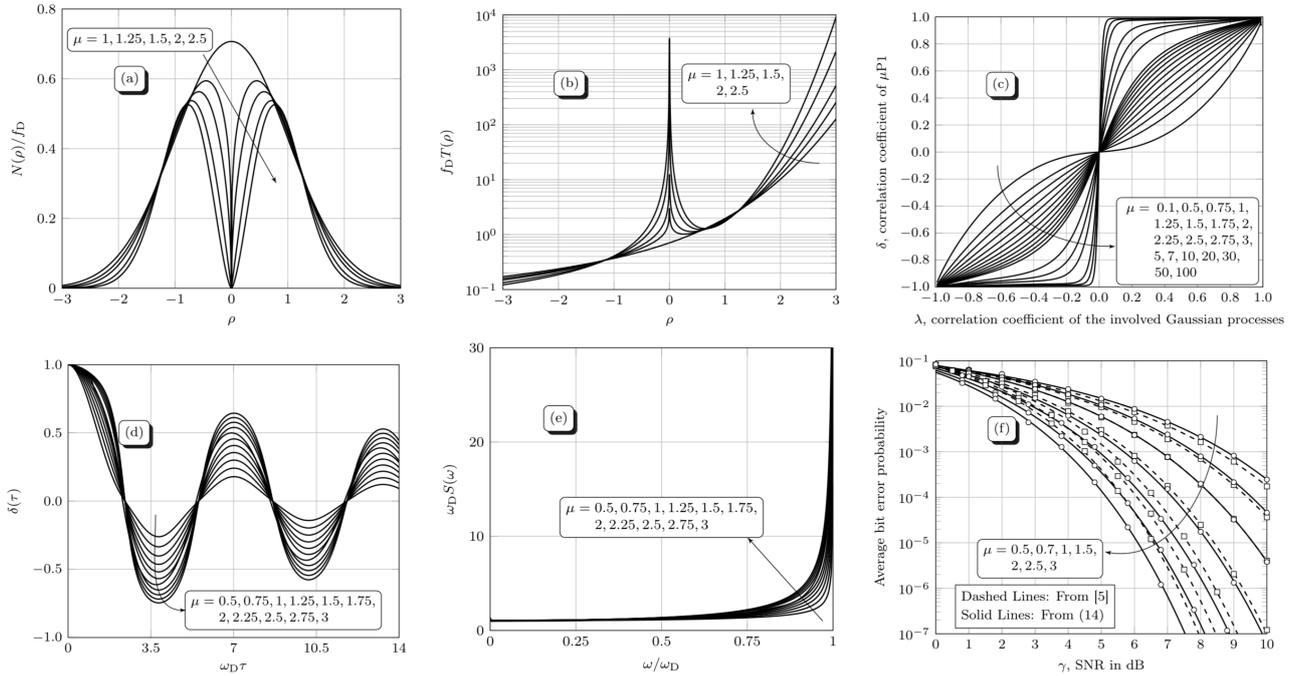


Figura 1: Variação do parâmetro μ na análise de: (a) taxa de cruzamento de nível, (b) duração média de desvanecimento, (c) coeficiente de correlação, (d) coeficiente de autocorrelação, (e) densidade espectral de potência e (f) probabilidade média de erro de bit.

A introdução destes dois parâmetros não alterou as estatísticas relacionados à envoltória do sinal, mas permitiu generalizar a equação do modelo combinando os Formatos 1 e 2 do modelo η - μ original. Além disso, os pesquisadores observaram que esta nova representação afeta diretamente as estatísticas relacionadas à fase do sinal. É importante mencionar que a fase é utilizada para investigar a capacidade ergódica máxima de sistemas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), as taxas de erro em sistemas *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e a performance da estimação de portadora em sistemas coerentes. Sendo assim, os pesquisadores do projeto obtiveram formulações exatas e aproximadas para a função densidade de probabilidade da fase contemplando os parâmetros de correlação e desbalanceamento de potência entre os processos em fase e quadratura. Também, foi possível parametrizar estes conceitos em uma expressão para a fase do modelo Hoyt. A Figura 2 ilustra o comportamento da função densidade de probabilidade da fase em coordenadas polares diante da variação dos parâmetros η_1 e η_2 .

2.3 Error Probability of *M-Phase Signaling With Phase Noise Over Fading Channels*

Em esquemas de modulação, a probabilidade de erro de símbolos é analisada sob uma perspectiva ideal, na qual considera-se que o receptor tem acesso à referência de fase. Na prática, no entanto, a referência de fase é estimada localmente com base no sinal recebido. Devido aos efeitos do canal, a estimação realizada no receptor é imperfeita, resultando em erros aleatórios de fase, comumente modelados pela distribuição von Mises (Tikhonov). Estes erros afetam o processo de sincronização de portadoras, prejudicando a performance do sistema de comunicação. Nas redes 6G, o sincronismo é fundamental para garantir suporte simultâneo a

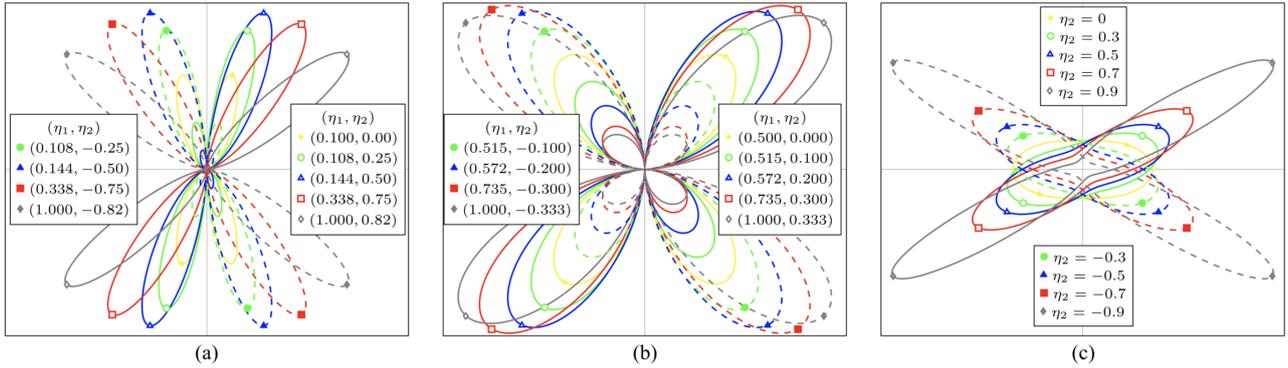


Figura 2: Função densidade de probabilidade da fase: (a) $\eta = 0,1$ e $\mu = 1,25$, (b) $\eta = 0,5$ e $\mu = 1,25$, e (c) caso Hoyt com $b = 1/3$.

múltiplos usuários com operações em faixas de frequência distintas. Desta forma, compreender e modelar os efeitos do canal são essenciais para auxiliar na projeção da próxima geração de redes móveis.

Neste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G investigaram em [7] os efeitos do erro de fase na performance da taxa média de erros de símbolo em esquemas de modulação *M-ary Phase-Shift Keying* (MPSK) em cenários com e sem desvanecimento. Assim, os pesquisadores propuseram uma expressão analítica para a função densidade de probabilidade dos efeitos conjuntos do canal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) e do erro de fase modelado pela distribuição von Mises. A partir deste resultado, foram obtidas formulações exatas para taxa de erro média de símbolos em cenários sem desvanecimento e com desvanecimento. Nos cenários com desvanecimento, foram avaliados os modelos α - μ , η - μ e κ - μ , sob a influência do erro de fase.

As expressões analíticas foram validadas por meio de simulação Monte Carlo. Nestas, foram avaliadas os esquemas de modulação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) e *8 Phase-Shift Keying* (PSK) para os cenários com e sem desvanecimento. Em todos os casos, as curvas teóricas concordaram perfeitamente com as simulações, indicando a utilidade das expressões na avaliação da performance de esquemas MPSK. Além disso, os pesquisadores observaram que o erro de fase mais severo sobrepõe a influência do desvanecimento no canal.

2.4 Fading Evaluation in Standardized 5G Millimeter-Wave Band

Para garantir uma maior taxa de dados, as redes 5G expandiram o espectro de transmissão para a faixa de ondas milimétricas (30 GHz a 300 GHz). Essa faixa de frequência também será explorada pelas redes 6G, que avalia o uso da faixa sub-THz para a transmissão de dados com elevada largura de faixa. A banda acima de 30 GHz facilita a implementação de estruturas de pico e nano células, aumentando a densidade da rede e, conseqüentemente, a capacidade da mesma em termos de vazão por unidade de área. No entanto, o uso de ondas milimétricas apresenta diversos desafios que incluem baixo alcance de comunicação e interferência de fenômenos atmosféricos em cenário de propagação com e sem linha de visada. Diversos estudos foram realizados para caracterizar o comportamento do canal nesta banda. No entanto, a maioria destes estudos investigaram os efeitos de propagação em larga escala, majoritariamente, representado pelo sombreamento. Sendo assim, para preencher esta lacuna, os pesquisadores do projeto Brasil 6G realizaram uma campanha de medições em ambiente laboratorial para

caracterizar o desvanecimento de pequena escala de primeira e segunda ordem nas frequências de 26, 28 e 39 GHz, que são as faixas de frequência atualmente padronizadas pelo International Telecommunication Union (ITU) para as redes 5G. Os resultados obtidos foram relatados em [8]. Além disso, os pesquisadores derivaram expressões simplificadas para a função densidade de probabilidade, função acumulativa de probabilidade e taxa de cruzamento de nível da envoltória no modelo de desvanecimento κ - μ , na qual $\mu = n + 1/2$ com $n \in \mathbb{N}$.

As medições foram realizadas em colaboração com o instituto de pesquisa iTEAM da Universitat Politècnica de València. Foram elaborados seis cenários de transmissão, na qual variam-se a distância de separação entre antenas transmissoras e receptoras, e a presença e ausência de linha de visada. Desta forma, os pesquisadores avaliaram e estimaram as estatísticas de primeira e segunda ordem para os modelos de desvanecimento Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , κ -1/2, κ -3/2, η - μ e α - η - κ - μ de acordo com os dados coletados nas medições. O ajuste de cada estatística foi avaliada em termos das métricas *Normalized Mean Square Error* (NMSE), Kolmogorov-Smirnov (KS) e *Akaike Information Criterion* (AIC). O objetivo destas métricas é definir qual modelo apresenta um melhor ajuste aos dados medidos. Nas Figura 3 e 4, apresentam-se as curvas estimadas da função densidade de probabilidade e função acumulativa de probabilidade para os dados obtidos no cenário em que as antenas de transmissão e recepção estão operando com visada direta em 28 GHz e encontram-se a 4,36 m de distância. Neste caso, o modelo α - η - κ - μ apresentou melhores ajustes considerando as métricas NMSE e KS, e o modelo α - μ para a métrica AIC.

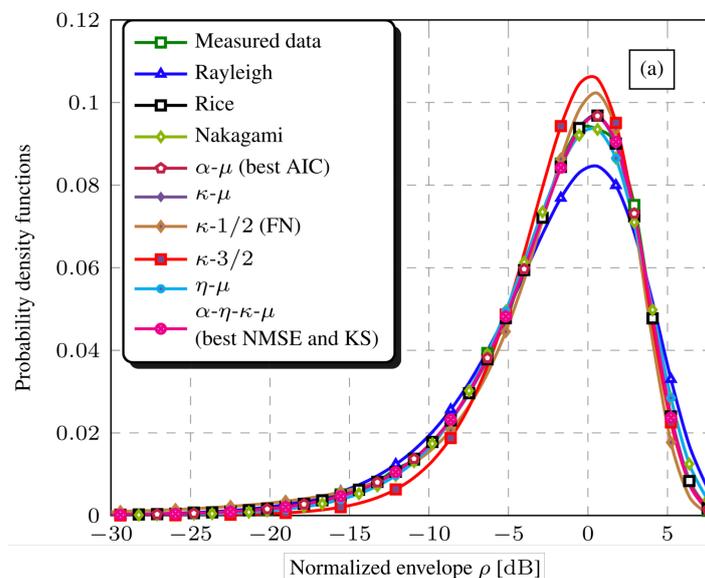


Figura 3: Estimativas obtidas operando em 28 GHz para a função densidade de probabilidade de diferentes modelos de desvanecimento.

Um análise detalhada dos resultados indicou que o modelo de desvanecimento generalizado α - η - κ - μ apresentou melhores ajustes devido a sua característica singular de englobar diversos fenômenos de desvanecimento. No entanto, a utilização deste recurso aumenta a complexidade matemática do sistema, penalizando o processo de estimação. Desta forma, os demais modelos generalizados (e menos complexos), representados por α - μ , κ - μ e η - μ , são também uma boa opção para caracterizar o desvanecimento em sistemas de comunicação sem fio.

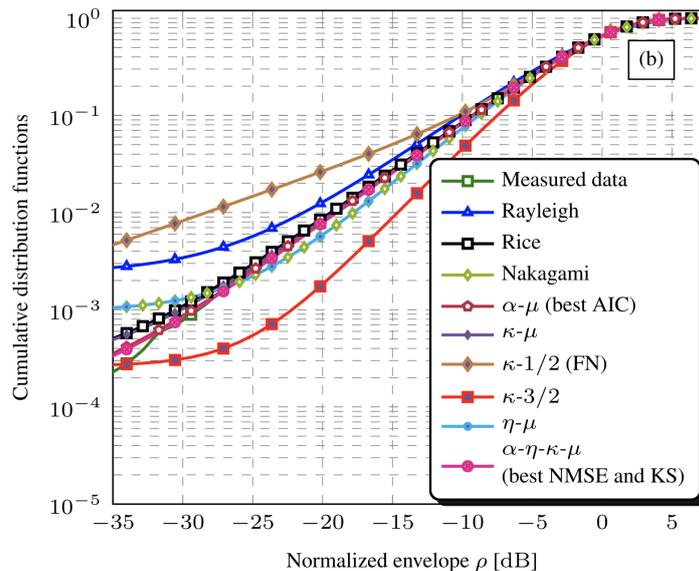


Figura 4: Estimativas obtidas operando em 28 GHz para a função acumulada de probabilidade de diferentes modelos de desvanecimento.

2.5 *Performance-traffic-trade-off of two novel hard decision and two soft decision fusion periodogram-based algorithms for cooperative spectrum sensing under unreliable reporting channel*

Diversos cenários que são previstos para as redes 6G irão demandar o uso oportunista de faixas de frequências ociosas, mantendo-se a proteção e a coexistências com os serviços considerados primários, que são aqueles que detém o direito de uso do canal. Neste caso, os dispositivos das futuras redes móveis que forem explorar essas oportunidades de transmissão precisarão realizar o sensoriamento espectral para garantir que não irão iniciar uma transmissão em um canal ocupado por uma rede primária. Esse sensoriamento espectral é um ferramenta essencial para coexistência e funcionamento harmonioso das futuras redes móveis e com as tecnologias legadas.

O usuário oportuno (ou usuário secundário) poderá realizar este procedimento de forma individual (não cooperativa) ou coletiva, denominado como *Cooperative Spectrum Sensing* (CSS). Neste último, o processamento centralizado é realizado por um sistema denominado por *Fusion Centre* (FC), cuja os dados são alimentados pelos diversos usuários secundários da rede. As informações do sensoriamento são classificadas a partir dos métodos de decisão *soft* e *hard*. No método *soft*, o usuário secundário envia os dados brutos para o FC, e no método *hard*, o usuário secundário envia a sua própria decisão sobre o estado de inatividade do canal. Ao receber estes dados, o FC define as condições do canal e repassa a informação para os demais usuários secundários da rede. As decisões para ambos os métodos são tomadas a partir de testes estatísticos com base em métricas do sistema. Entre os diversos testes apresentados na literatura, o *Circular Folding Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation* (CF-CPSC) é um método de decisão *soft* baseado na estimação da densidade espectral de potência do sinal recebido. Este método apresenta baixa complexidade de implementação e é bastante robusto em cenários cujo o usuário secundário está sujeito a diferentes ruídos. Por ser um método *soft*, o CF-CPSC exige um tráfego maior de dados no processo de comunicação entre o usuário e o FC.

Neste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram em [9] dois novos algoritmos de decisão *hard* baseado no CF-CPSC. No primeiro algoritmo, o CF-CPSC é empregado parcialmente nos usuários secundários de forma que cada nó realiza o processo de decisão sobre a inatividade da sua respectiva sub-banda. Em seguida, o FC combina as informações de inatividade de todas as sub-bandas, realiza a decisão e as distribui para os demais usuários secundários. No segundo algoritmo, o CF-CPSC é realizado integralmente, ou seja, além de definir o estado de inatividade da sua respectiva sub-banda, os usuários secundários combinam os estados de todas as sub-bandas e transmitem o resultado para o FC. Em ambos os algoritmos, observou-se uma redução significativa do tráfego de informações do estado de inatividade. Os algoritmos foram avaliados para os canais binário simétrico sem memória e Gilbert-Elliott com memória. Os resultados numéricos indicaram que a memória do canal prejudicou a performance dos algoritmos adotados. Apesar disso, a performance de ambos os algoritmos é superior aos métodos *soft* comumente empregados. Ainda, os algoritmos são mais robustos aos efeitos dos erros dos canais avaliados. Por fim, os pesquisadores concluíram que a escolha do algoritmo ótimo depende exclusivamente de uma análise específica para cada cenário.

2.6 *Weighted Circular Folding Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation Algorithm*

O aumento de novos usuários na rede móvel e a proliferação de dispositivos *Internet-of-Things* (IoT) tem provocado uma redução no espectro licenciado para comunicação. Para solucionar esta situação, a nova política de acesso dinâmico ao espectro permite que usuários secundários possam oportunisticamente utilizar as faixas desocupadas. Este procedimento é realizado a partir de técnicas de sensoriamento do espectro, como CSS. Este método consiste na colaboração de diversos usuários secundários para detectar o sinal do usuário primário. A técnica cooperativa tem mostrado performance superior à sua contrapartida não cooperativa, principalmente, por atenuar os efeitos causados pelo desvanecimento por sombreamento e por multipercurso. Entre os diversos esquemas CSS, o *Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation* (CPSC) e o CF-CPSC se destacam devido à baixa complexidade computacional e robustez em relação ao ruído dinâmico.

Diante deste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram em [10] uma versão modificada do algoritmo CF-CPSC definida por *Weighted* CF-CPSC (WCF-CPSC). Nesta, os testes estatísticos são ponderados para definir as estatísticas finais do sistema. Os pesos são definidos a partir de dois métodos, sendo o primeiro próximo ao ótimo e o segundo, sub-ótimo. No primeiro modelo, a definição dos pesos está restrita à informação da densidade espectral de potência obtida pelo receptor, afetando a sua complexidade. O segundo modelo é menos complexo e adota o decaimento linear dos pesos. A performance de ambos os modelos foi avaliada e comparada àquela obtida com o algoritmo CF-CPSC. Em todos os cenários investigados, a performance do WCF-CPSC foi superior ao CF-CPSC. Ainda, tanto o modelo próximo ao ótimo quanto o sub-ótimo apresentaram resultados semelhantes. Desta forma, os autores concluíram que o modelo sub-ótimo é a melhor opção para o WCF-CPSC devido a melhor relação custo-benefício entre desempenho e complexidade.

2.7 *Pietra-Ricci Index Detector for Centralized Data Fusion Cooperative Spectrum Sensing*

Como mencionado anteriormente, as técnicas de sensoriamento espectral possibilitarão o uso oportunista de faixas de frequências ociosas, garantindo coexistência entre os serviços primários e secundários no canal. Neste contexto, a definição da inatividade do canal depende do resultado de testes estatísticos realizados com algumas métricas do sistema. No caso do CSS centralizado, os testes são conduzidos pelo FC após o processamento da Matriz de Covariância das Amostras (MCA) do sinal recebido. Na literatura, a MCA é utilizada em diversos testes de detecção de usuário primário. Entre estes, destacam-se os detectores Hadamard *Ratio* (HR), *Arithmetic-Geometric Mean* (AGM), *Volume-based Detector* (VD), *Maximum-Minimum eigenvalue detector* (MMED), *Generalized Likelihood Ratio Test* (GLRT) e *Gini Index Detector* (GID). Este último, comparado aos demais detectores, é computacionalmente menos complexo e apresenta uma melhor performance diante de variações na potência do ruído.

Assim, o objetivo do trabalho desenvolvido em [11] é apresentar um novo teste estatístico baseado no índice Pietra-Ricci. Este índice é comumente utilizado em estudos socioeconômicos e indica a o nível de desigualdade salarial de uma população. No sensoriamento espectral, o índice foi modificado para quantificar os níveis de desigualdade entre os elementos da MCA, sinalizando a mudança de estado do usuário primário. Desta forma, o índice poderá ser utilizado para como um teste estatístico para o sensoriamento espectral. O novo modelo, denominado PRIDE, foi comparado aos testes HR, AGM, VD, MMED, GLRT e GID. No quesito complexidade computacional e performance, o PRIDE apresentou melhores resultados, inclusive em relação ao GID. Ainda, simulações indicaram que o PRIDE é robusto contra variações não uniformes do sinal recebido e da potência do ruído.

2.8 *Design Guidelines for Database-Driven Internet of Things-Enabled Dynamic Spectrum Access*

A integração completa entre seres humanos e máquinas é um dos objetivos fundamentais da rede 6G. Este processo permitirá a ampliação dos dispositivos IoT em qualquer ambiente, garantindo o compartilhamento de dados entre todos os dispositivos conectados na rede. Desta forma, os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram um framework em [12] para a realização de sensoriamento espectral a partir de dispositivos IoT. Como já discutido, o sensoriamento espectral é uma ferramenta importante para possibilitar o compartilhamento harmonioso e dinâmico do espectro diante da inatividade do usuário primário.

No framework proposto, os usuários primários e secundários, e os dispositivos IoT estão compartilhando a mesma cobertura de radio. Assim, o sensoriamento espectral ficará sob responsabilidade de alguns dispositivos IoT munidos de um módulo exclusivo para esta finalidade. Além do monitoramento do espectro, o módulo fornecerá os dados de geolocalização do dispositivo. Desta forma, os dados serão enviados pela camada de aplicação à um banco de dados exclusivo para registrar o espectro ocioso, também conhecido como *white spaces*. As informações sobre a inatividade do canal estarão disponibilizadas para qualquer usuário secundário interessado no acesso dinâmico do espectro. Desta forma, não será necessário infraestrutura de sensoriamento no usuário secundário, reduzindo a sua complexidade. Finalmente, neste framework qualquer técnica de sensoriamento e detecção de inatividade poderá ser utilizada.

Além disso, os pesquisadores também especificaram a arquitetura do banco de dados que registrará o espectro ocioso e monitorará a atividade dos usuários primários e secundários. O

banco é composto por duas entidades principais: o subsistema de sensoriamento espectral e o subsistema de geolocalização e locação do espectro. O subsistema de sensoriamento espectral irá registrar e gerenciar a rede IoT e os dispositivos aparelhados com o módulo de sensoriamento. Também, este subsistema será responsável por definir a ociosidade do espectro baseado nos dados coletados pelos dispositivos IoT. O subsistema de geolocalização e locação do espectro irá gerenciar os dados dos usuários primários e secundários. Neste, serão calculadas as zonas de proteção dos usuários baseados na sua localização e outros dados do ambiente. O subsistema também gerenciará as regras de locação do espectro de acordo com as políticas da agência reguladora.

Por fim, a integração das tecnologias IoT com sensoriamento espectral permitirá implementar um novo nicho mercadológico para exploração do espectro ocioso. O framework atuará diretamente no controle e negociação direta entre usuários primários e secundários a partir do uso de contratos inteligentes.

2.9 *Secure Vehicular Communications through Reconfigurable Intelligent Surfaces*

A *Reflective Intelligent Surface* (RIS) é uma tecnologia capaz de redirecionar o feixe do sinal transmitido para um determinado usuário, maximizando a *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) na antena receptora. Atualmente na comunidade científica, a RIS está sendo amplamente investigada para as redes 6G, principalmente, por possibilitar a expansão da cobertura da rede, o aumento da taxa de transmissão de dados e a mitigação do efeito Doppler provocado pela mobilidade de transceptores. Diante deste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G investigaram a segurança de redes veiculares auxiliadas por RIS. A segurança da informação é um pilar fundamental para qualquer sistema de comunicação. Nas redes 6G, a segurança na camada física está sendo considerada para complementar as técnicas de criptografia e aumentar o sigilo da comunicação.

Assim, o estudo teve como objetivo analisar a probabilidade de interrupção de sigilo para os cenários de comunicação em redes veiculares, representados pela Figura 5. O primeiro cenário consiste na comunicação *Vehicular-to-Vehicular* (V2V) intermediada pela RIS. Neste caso, o sinal do enlace direto entre os veículos está degradado devido a presença de outros objetos. O segundo cenário simula a comunicação *Vehicular-to-Infrastructure* (V2I), ou seja, o veículo se comunica com a infraestrutura de transporte inteligente a partir da RIS. Em ambos os cenários, as mensagens podem ser interceptadas por um veículo localizado a uma distância d_{SE} .

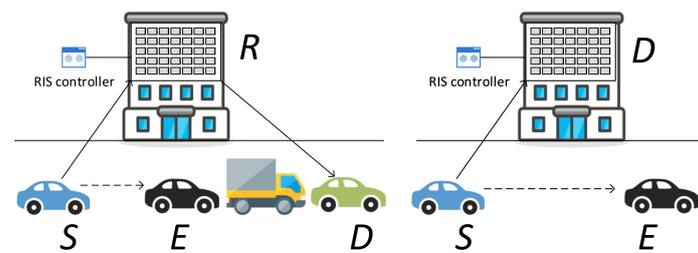


Figura 5: Cenários de comunicações V2V (esquerda) e V2I (direita).

Para realizar a análise da probabilidade de interrupção de sigilo, os pesquisadores definiram a modelagem matemática para cada cenário investigado. Foram propostas novas equações para a função densidade de probabilidade e função acumulada de probabilidade para a SNR

instantânea dos enlaces de comunicação entre os veículos do cenário V2V, entre o veículo e a RIS no cenário V2I, e entre o veículo e o interceptador presente em ambos os cenários. Por fim, no cenário V2V, foi considerado duas situações distintas: (i) a RIS tem conhecimento do estado do canal; e (ii) a RIS desconhece o estado do canal. Neste último, os deslocamentos de fase realizados pela RIS são modelados por uma distribuição uniforme.

No cenário V2V, a probabilidade de interrupção de sigilo foi analisada em termos da SNR instantânea de transmissão (P_s/N_0), como ilustrada na Figura 6. Entre os parâmetros avaliados, os pesquisadores observaram uma melhora significativa da métrica com o aumento do número de elementos refletores da RIS (N). Ainda, foi possível constatar que o deslocamento perfeito e aleatório de fase atuam, respectivamente, como os limites inferiores e superiores da probabilidade de interrupção. Já no cenário 2, a probabilidade de interrupção de sigilo foi avaliada em termos da quantidade de elementos refletores da RIS. Como apresentado na Figura 7, a performance da probabilidade de interrupção aumenta linearmente em relação a N na escala logarítmica. Além disso, as distâncias entre o veículo e a RIS (d_{SD}) e entre o veículo e o interceptador (d_{SE}) afetam diretamente no comportamento da inclinação das curvas e, conseqüentemente, na performance da probabilidade de interrupção de sigilo.

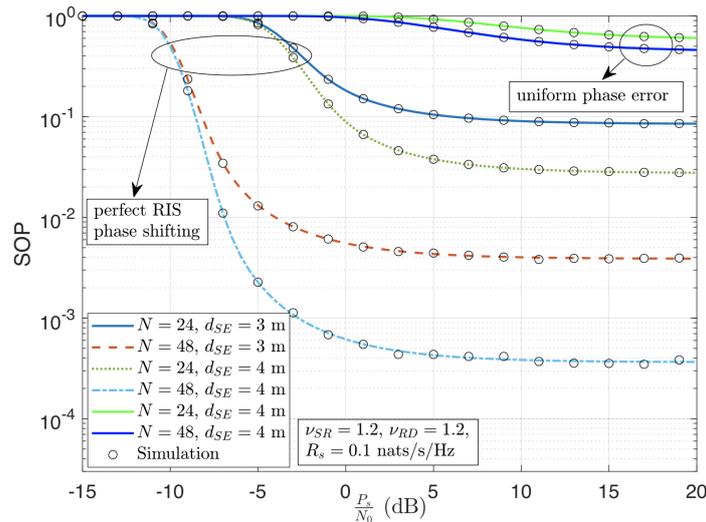


Figura 6: Probabilidade de interrupção de sigilo em função da SNR instantânea de transmissão variando o número de elementos refletores da RIS para o cenário V2V.

2.10 Large Intelligent Surfaces With Discrete Set of Phase-Shifts Communicating Through Double-Rayleigh Fading Channels

Superfícies inteligentes, capazes de serem empregadas como elementos de reflexão ativos em redes de comunicação móveis, estão sendo apontadas como uma das tecnologias fundamentais para viabilizar as redes 6G. Apesar de já existirem muitos estudos publicados sobre *Large Intelligent Surface* (LIS), ainda existem algumas lacunas nos modelos matemáticos no que se refere aos cenários possíveis e ainda não explorados. Em [13], os pesquisadores do projeto Brasil 6G avaliaram o desempenho de um sistema *Single-Input Single-Output* (SISO) em que a LIS atua como um espalhador reconfigurável. Considerou-se que o enlace direto entre os dispositivos de transmissão e recepção é inexistente devido a um bloqueio, como mostra a Figura 8.

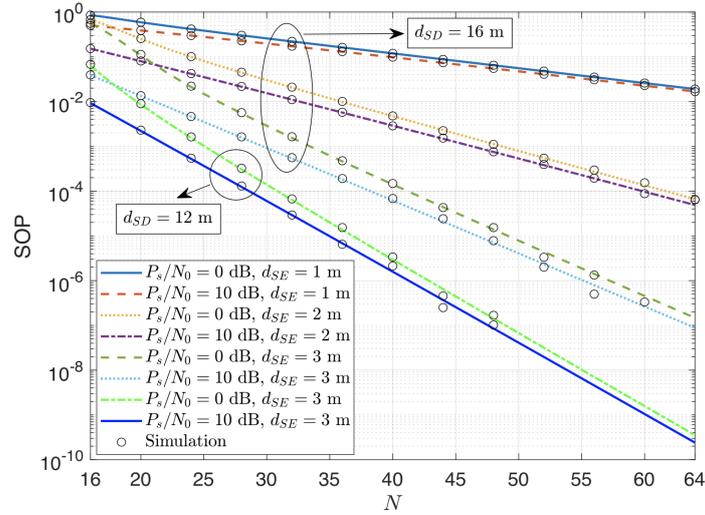


Figura 7: Probabilidade de interrupção de sigilo em função do número de elementos refletores da RIS para o cenário V2I.

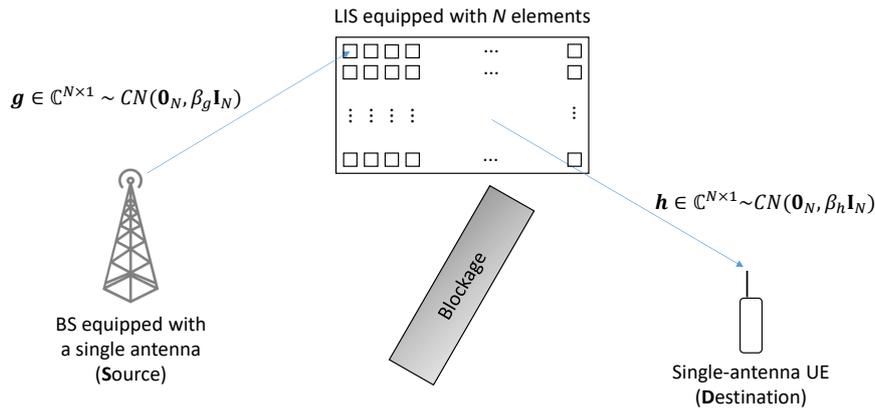


Figura 8: Modelo do sistema de comunicação *wireless* auxiliado por LIS.

Por outro lado, erros de quantização de fase na LIS são levados em consideração, uma vez que a resolução de alta precisão das fases de reflexão nem sempre é viável. Expressões exatas foram derivadas para as eficiências espectrais, probabilidades de interrupção e *Symbol Error Rate* (SER) para diferentes esquemas de modulação. Também assume-se um cenário mais abrangente em que b bits são dedicados ao ajuste de fase dos elementos da LIS. Com base em simulações de Monte Carlo, provou-se a excelente precisão da abordagem proposta. Outra contribuição consistiu na investigação do comportamento da potência em relação a distância entre os dispositivos e a definição sobre qual é a potência necessária para atingir uma capacidade específica, dependendo do número de elementos refletivos. Conclui-se que o desempenho melhora à medida que o número de elementos da superfície e/ou bits aumentam. Com aproximadamente cinquenta elementos e quatro bits dedicados à quantização de fase, o desempenho de um sistema auxiliado por LIS é capaz de superar o obtido a partir do sistema convencional sem LIS.

2.11 Bit Error Probability for Large Intelligent Surfaces Under Double-Nakagami Fading Channels

O artigo [14] foi um dos primeiros trabalhos da equipe do projeto Brasil 6G a respeito de superfícies inteligentes, onde investigou-se a distribuição de probabilidade dos coeficientes de desvanecimento do canal entre uma estação rádio-base, uma matriz LIS e um usuário de antena única, como representado na Figura 9.

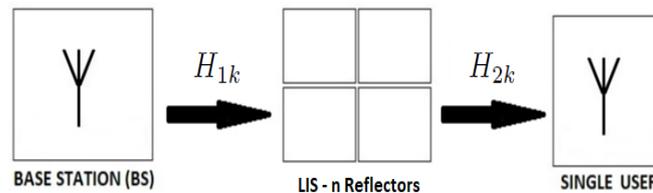


Figura 9: Modelo do sistema com entrada e saída únicas.

Além disso, este trabalho apresenta a probabilidade de erro para uma modulação *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK). O canal equivalente é o produto de duas distribuições Nakagami de parâmetro m , ou seja, um canal de desvanecimento Nakagami duplo, no qual o erro de estimação de fase na LIS segue a distribuição de von Mises. Considerando um grande número de elementos reflexivos, n , o artigo apresenta uma aproximação muito precisa para a taxa de erro de bit com base no teorema do limite central, mostrando que a mesma é exata para $n = 2$ ou $n = 3$, conforme mostra a Figura 10. Para enfatizar a exatidão da expressão encontrada, o eixo Y está em escala logarítmica. A partir da Tabela 1, que mostra o *Mean Square Error* (MSE) em relação à distribuição exata, a acurácia da aproximação proposta fica evidente. Pode-se notar que o erro é menor que 5% para $n \geq 32$ e praticamente nulo quando $n > 128$.

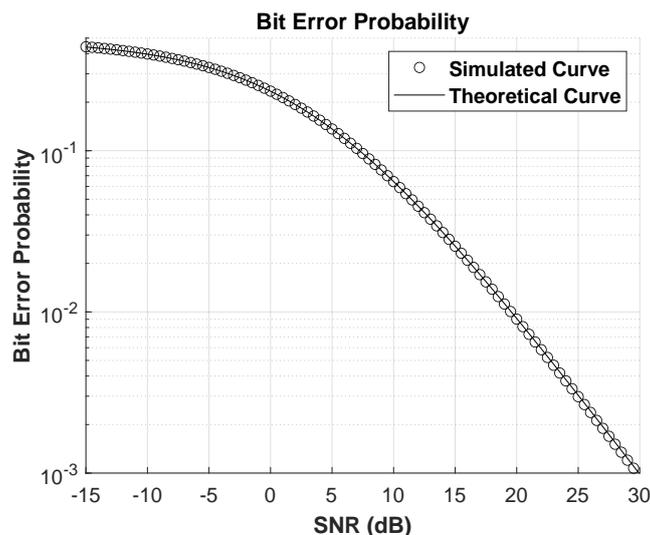


Figura 10: Probabilidade exata de erro de bit para $n = 2$.

Tabela 1: MSE entre as distribuições exata e proposta.

n	MSE	MSE (%)
2	0,1701	17,1
4	0,1306	13,06
8	0,1077	10,77
16	0,0784	7,84
32	0,0451	4,51
64	0,0143	1,43
128	0,0001	0,01

2.12 Large Intelligent Surfaces Communicating Through Massive MIMO Rayleigh Fading Channels

As superfícies inteligentes prometem não apenas melhorar a relação sinal-ruído e eficiência espectral, mas também reduzir o consumo de energia durante a transmissão de dados em redes móveis. No artigo [15], os pesquisadores do projeto Brasil 6G consideraram uma estação rádio-base equipada com um conjunto de antenas que empregam a técnica *Maximum Ratio Transmission* (MRT) e um grande conjunto de refletores enviando sinais para um único usuário. Cada subcanal é afetado pelo desvanecimento plano de Rayleigh, e os elementos refletivos realizam correção de fase não perfeita, que introduz um erro de fase distribuída de von Mises, como mostrado na Figura 11.

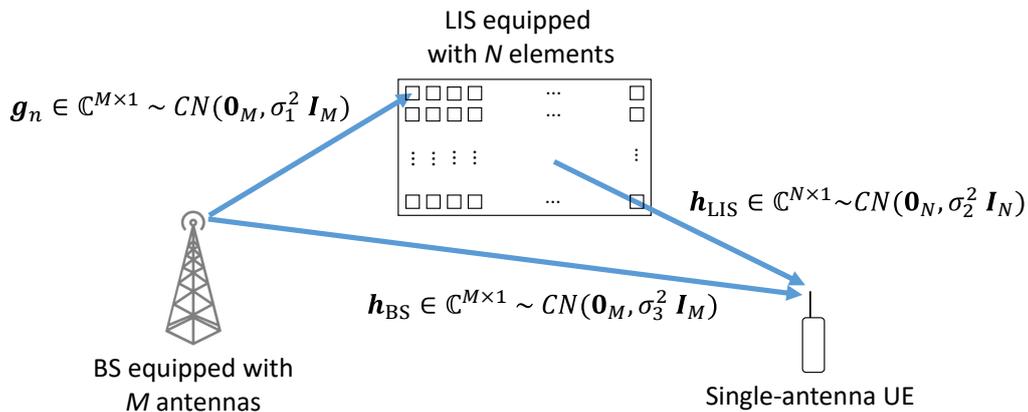


Figura 11: Modelo do sistema MIMO auxiliado por LIS.

Com base no teorema do limite central, é possível demonstrar que o canal geral tem um desvanecimento Gamma equivalente cujos parâmetros são derivados dos momentos de desvanecimento do canal em cascata entre o arranjo de antenas e a LIS, e também da LIS para o usuário com única antena. Assumindo que o canal equivalente possa ser modelado como uma distribuição Gama, é possível derivar expressões de forma fechada muito precisas para a probabilidade de erro de bit e um limite superior muito restrito. Para o caso em que a LIS não seja capaz de realizar o cancelamento de fase perfeito, e portanto há erros de fase, é possível analisar o desempenho do sistema considerando as aproximações analíticas e os resultados si-

mulados obtidos pelo conhecido método de Monte Carlo. A Figura 12 mostra a precisão de da aproximação proposta por meio da divergência de Kullback-Leibler de $|h|^2$, em que h é o canal em cascata do sistema. É possível constatar sua validade mesmo quando o erro de fase segue a distribuição uniforme ou de von Mises com parâmetro de concentração arbitrário. Na ausência de erro de fase, a divergência entre a distribuição simulada e a abordagem analítica proposta diminui ainda mais rápido com o aumento do número de refletores na LIS.

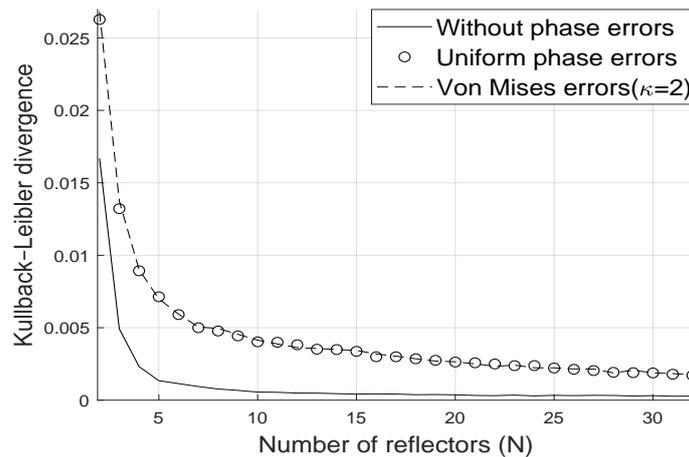


Figura 12: Divergência de Kullback–Leibler para $|h|^2$.

Vale ressaltar que as expressões analíticas para os parâmetros da distribuição Gama são muito difíceis de serem obtidas devido à complexidade das transformações não lineares de variáveis aleatórias com média diferente de zero e serem correlacionadas. Mesmo com o cancelamento de fase perfeito, todos os coeficientes de desvanecimento continuam complexos devido à existência do enlace direto entre o usuário e a estação rádio-base, que não é negligenciada em [15].

2.13 *Secrecy Analysis and Error Probability of LIS-aided Communication Systems under Nakagami- m Fading*

As superfícies inteligentes são uma nova tendência para alcançar a maior eficiência espectral e relação sinal-ruído em comunicações móveis. Os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram métricas para analisar o desempenho de sistemas com múltiplas antenas auxiliadas por LIS e derivar a eficiência espectral, probabilidade de interrupção de sigilo e probabilidade de erro de bit em um ambiente com desvanecimento distribuído Nakagami- m [16]. Nesta pesquisa, foram considerados um invasor que visa monitorar a comunicação e um usuário de antena única. Assume-se também que há um conjunto de antenas no lado do transmissor, podendo haver um enlace direto entre o transmissor da estação rádio base e o receptor do terminal móvel, tal como mostra a Figura 13.

Este estudo assume que a LIS não é perfeita. Ela realiza o cancelamento de fase não-ideal, o que conseqüentemente gera um erro de fase residual que segue uma distribuição de von Mises. Através de simulações de Monte Carlo, conclui-se que o canal resultante pode ser modelado com precisão por uma variável aleatória que segue a distribuição de gama, cujos parâmetros são derivados analiticamente. A partir dessas das derivações apresentadas em [16], é possível avaliar o efeito da intensidade do enlace de visada direta variando o parâmetro da variável aleatória

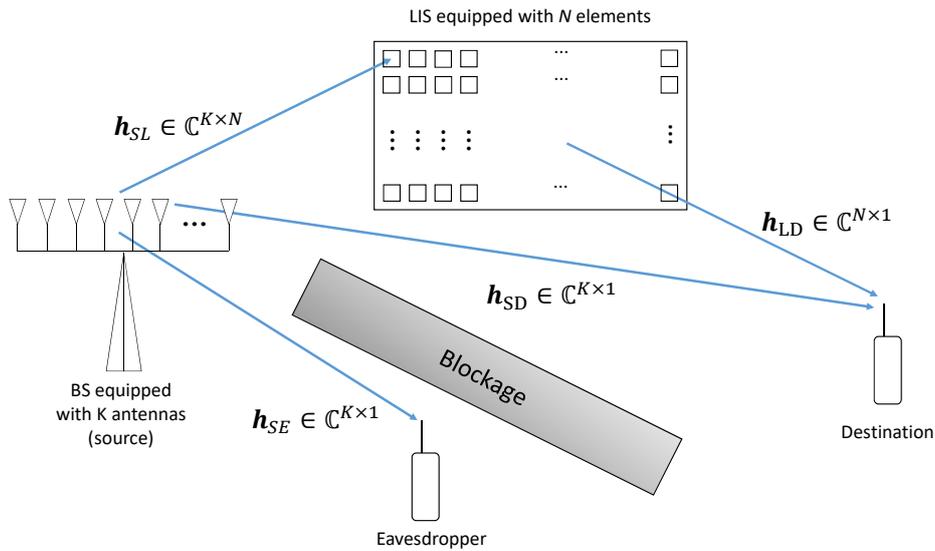


Figura 13: Modelo do sistema com um bisbilhoteiro.

com distribuição de Nakagami- m . Por derivação matemática e como mostrado na Figura 14, quanto maior o número de refletores, N , menor a probabilidade de erro para qualquer valor de relação sinal-ruído. Quando os erros de fase são uniformemente distribuídos ($\kappa = 0$), a probabilidade de erro é maior do que no cenário de von Mises. Este resultado mostra a importância de estimar com precisão as fases e os ganhos do canal e escolher o método de otimização para modelar os coeficientes de reflexão da LIS. Ruído de fase uniformemente distribuído indica que o algoritmo tem chances iguais de apresentar erros de fase significativos (próximos a π) ou pequenos (próximos de zero). Isso implica em maiores probabilidades de erro de bit, que podem ser compensados apenas com um grande número de antenas no transmissor ou de refletores no LIS.

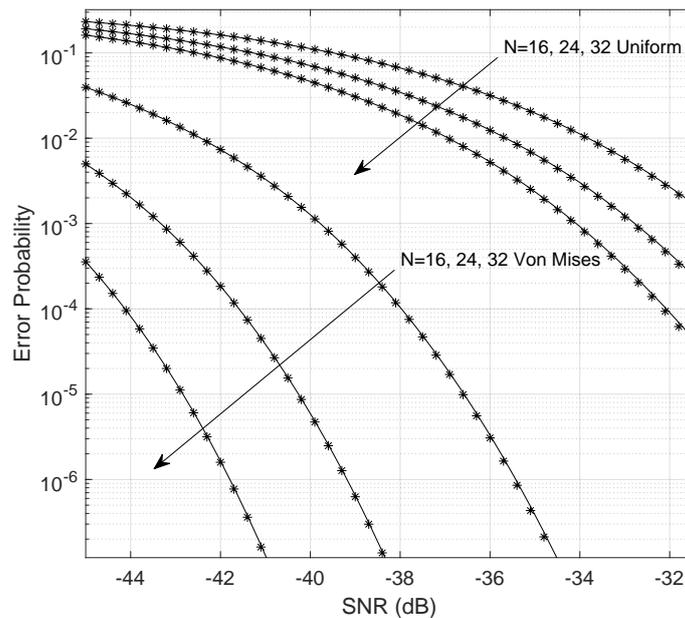


Figura 14: Probabilidade de erro de bit quando há variação da SNR.

2.14 Comunicação LoRa na Zona Rural: Análise Baseada em uma Campanha de Medição no Noroeste Paulista

A infinidade de cenários previstos para as redes 6G irá demandar que a mesma explore todas as tecnologias disponíveis para aumentar a sua capilaridade e também permitir o *offloading* de dados em sistemas complementares. A integração da tecnologia *Long Range* (LoRa) como uma das interfaces de dados para a coleta de dados em redes 6G voltadas para o agronegócio pode trazer diversas vantagens para as aplicações que demandam baixo volume de dados e longo alcance. Os requisitos de baixo consumo de energia e ampla cobertura de área fazem do LoRa uma solução interessante para aumentar a integração das redes 6G com a IoT no campo.

Em [17], os pesquisadores desenvolveram um protótipo de rastreamento bovino de baixo custo usando tal tecnologia de forma a fomentar a agricultura de precisão e aumentar a produtividade do campo. Seu uso poderá evitar furto de gado, determinar a distância percorrida pelo animal, a fim de estimar a quantidade de ração disponibilizada diariamente, além de poder transmitir informações acerca da saúde do animal, como por exemplo, a temperatura, e antecipar o atendimento veterinário. Por outro lado, tal tecnologia pode ser também usada no sistema de controle de bombas hidráulicas, monitoramento de níveis de bebedouros, rastreamento de insumos de alto custo, entre outros, formando um ecossistema de gerenciamento remoto. O foco desta iniciativa foi apresentar os estudos preliminares e testes de conceito acerca do alcance da comunicação, além de descrever algumas etapas de desenvolvimento de um protótipo que possa culminar em um produto voltado para o mercado nacional. Avaliou-se o alcance atingido da tecnologia LoRa, levando em consideração as características de propagação do sinal no cenário com menor consumo de energia. Como mostrado na Figura 15, por facilidade de manuseio, o protótipo do rastreador foi adaptado a um equino, em uma bicicleta e em um carro que percorreram as estradas vicinais próximas a uma propriedade rural no noroeste paulista. O alcance de tal tecnologia foi de até 8 km quando o fator de espalhamento foi igual a 7.

Além disso, com os dados obtidos nas medições foi possível aplicar o algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt e verificar que o expoente de decaimento igual a 3,41 é o que melhor modela o meio de propagação. Esse resultado pode ser verificado na Figura 16. Dessa forma, conclui-se que a tecnologia LoRa pode ser uma solução interessante para estender a oferta de conectividade IoT provida por uma rede móvel de próxima geração, quando o requisito de consumo energético for muito restritivo e a demanda por vazão de dados for muito baixa.

2.15 *A Low-Complexity Deep Neural Network for Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio Estimation*

No artigo [18], os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram uma abordagem de estimação precisa da *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio* (SINR) baseada em IA. As futuras redes móveis de 6^a geração vão se basear em indicadores que precisam apresentar um alto nível de precisão para atingir a qualidade de serviços que esperada. Um dos balizadores para a adaptação de vazão e confiabilidade de um enlace, ou *Adaptive Coding Modulation* (ACM), é o índice definido como *Modulation Coding Scheme* (MCS). Dependendo da forma como este índice é computado, dentro das condições impostas pelo canal, deve-se definir o atingimento, tanto de uma meta de alta confiabilidade, ou robustez, como também de uma taxa de dados o mais alta possível que satisfaça uma determinada condição alvo de *Bit Error Rate* (BER) ou *Block Error Rate* (BLER).

Para ambos os casos, é necessário que se tenha uma estimação bastante precisa de SINR.



Figura 15: Dispositivo móvel adaptado ao equino, bicicleta e carro.

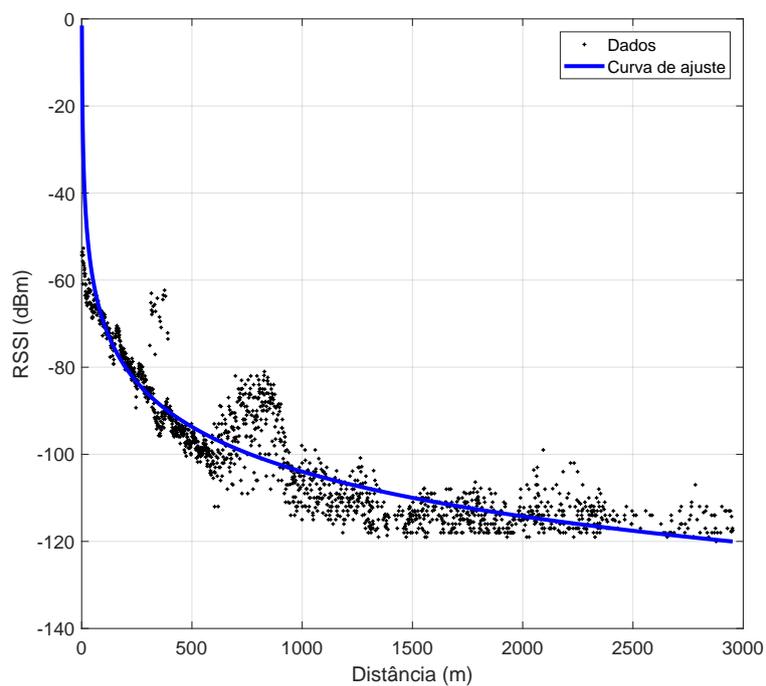


Figura 16: Ajuste de curva exponencial aos dados.

Há várias técnicas para fazer esta estimação, como utilizando o *Cyclic Prefix* (CP), preâmbulos e símbolos pilotos. Em todos estes casos, a estimativa da SINR é baseada no conhecimento do sinal que foi transmitido.

O uso das subportadoras que trafegam dados para fazer esta estimação fornece um número superior de elementos estatísticos, o que torna a estimativa mais precisa e confiável. Além disso,

as subportadoras de um dado segmento do espectro indicam diretamente o estado em que se encontra a região espectral empregada para a transmissão dos dados utilizados na obtenção da estimativa. O desafio, já que não são utilizadas partes conhecidas do sinal de transmissão, é a determinação mais exata possível do símbolo transmitido estimado, utilizando fatores de compensação que tornem a medida mais precisa.

O sistema considerado para fazer a análise do algoritmo proposto é baseado na camada física descrita pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* para a rede 5G, uma vez que este é o padrão de comunicação móveis mais recente disponível. No entanto, a abordagem descrita em [18] pode ser estendida para as redes 6G, tão logo haja uma definição da camada física da próxima geração da rede móvel. As constelações consideradas em [18] são o QPSK, 16-*Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*, 64-QAM e 256-QAM. A estimação da SINR foi computada através do cálculo do MSE obtido a partir de processo de estimação do sinal transmitido utilizando uma pré-decisão baseada na constelação empregada. Dada a imperfeição deste processo, que gera distorções não lineares, uma modificação foi proposta para retirar níveis de saturação e mitigar os erros introduzidos. Para contemplar esta modificação, no entanto, foi necessária a realização de cálculos estatísticos complexos que podem ser abordados por uma rede neural profunda de baixa complexidade. A Figura 17 apresenta um diagrama para descrever o modelo utilizado.

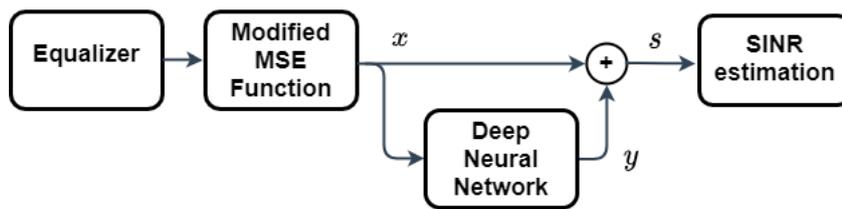


Figura 17: Esquema proposto com a função MSE modificada e rede neural profunda.

Os resultados alcançados foram satisfatórios, atingindo valores de estimação precisos, próximos do ideal. A Figura 18 apresenta um gráfico com os resultados obtidos.

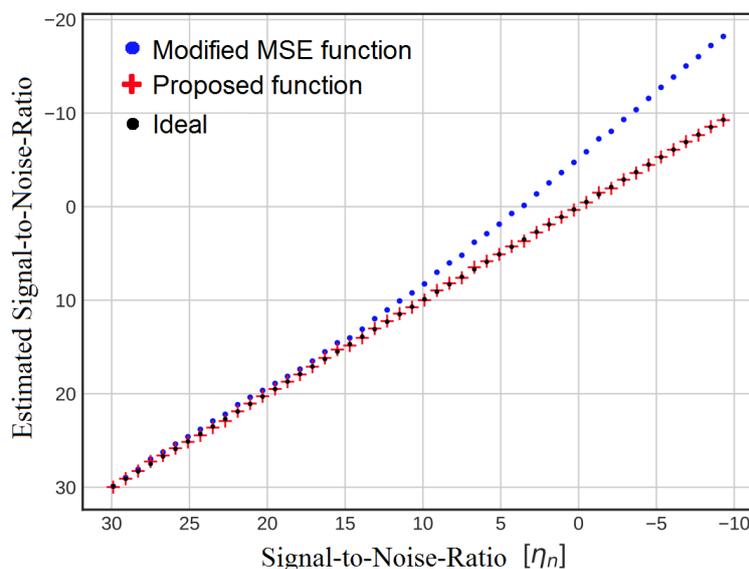


Figura 18: Resposta da função proposta.

Desta forma, concluiu-se que o uso de uma rede neural profunda de baixa complexidade pode melhorar a qualidade das estimativas de SINR para as redes móveis que empregam constelações M -QAM, permitindo inclusive explorar os dados de usuários para melhorar a qualidade desta estimativa e permitindo um controle mais apurado do MCS a ser empregado.

2.16 *Hybrid Multiple Access for Channel Allocation-Aided eMBB and URLLC Slicing in 5G and Beyond Systems*

Em [19], os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram um esquema *Hybrid Multiple Access* (HMA) que combina esquemas *Heterogeneous Non-Orthogonal Multiple Access* (H-NOMA) com *Heterogeneous Orthogonal Multiple Access* (H-OMA), com o objetivo de aumentar a capacidade das redes 6G. Mais especificamente, nesta pesquisa considerou-se o enlace de subida de um sistema de célula única com dispositivos eMBB e URLLC transmitindo para uma estação rádio base convencional. Ademais, a estratégia de HMA é aplicada no fatiamento da rede para serviços eMBB e URLLC, considerando que o algoritmo *Max-Matching Diversity* (MMD) é usado para alocar canais para usuários de eMBB. A Figura 19(a) apresenta uma análise da taxa de dados de ambos os serviços considerando que a SNR do usuário URLLC é inferior à SNR do usuário eMBB, ou seja, $\bar{\gamma}_U < \bar{\gamma}_B$.

Através dos resultados obtidos neste trabalho pode-se verificar que a interferência imposta pelo eMBB no tráfego URLLC faz com que seja necessário alocar vários canais exclusivamente para URLLC, de modo que o esquema HMA se comporte como o esquema H-OMA para praticamente todos os valores de taxa de dados. Portanto, neste cenário, o H-NOMA é mais vantajoso apenas para valores muito pequenos de taxa de dados para o usuário URLLC, definida como r_U . No entanto, quando $\bar{\gamma}_B < \bar{\gamma}_U$, o que pode ser considerado um cenário mais realista, dado o requisito de confiabilidade do URLLC, pode-se ver através da Figura 19(b) que o fatiamento da rede considerando HMA supera consideravelmente o H-OMA em toda a faixa de vazão analisada, apresentando também taxas de soma melhoradas em relação ao H-NOMA, principalmente para valores elevados de r_U . Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que técnicas de múltiplo acesso híbridas são interessantes para flexibilizar o atendimento de cenários distintos nas futuras redes móveis.

Portanto, este trabalho propôs um esquema HMA no escopo de divisão de recursos de rádio de rede entre usuários eMBB auxiliado por MMD e usuários URLLC. Com este método, o múltiplo acesso pode ser adaptado dinamicamente entre o H-OMA e o H-NOMA para atender aos requisitos dos serviços. Como resultado, foi mostrado que o HMA pode superar consideravelmente tanto o H-OMA quanto o H-NOMA auxiliado por um MMD autônomo, principalmente em cenários onde os dispositivos URLLC têm maiores SNRs médias do que os usuários eMBB. Tais cenários são considerados mais realistas dado o tipo de aplicativos que o serviço URLLC deve atender, como missão crítica e Indústria 4.0.

2.17 *Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surfaces without CSI*

Superfícies inteligentes terão um papel fundamental para o atendimento da qualidade de enlace em redes 6G. Em [20], os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram um método para resolver o problema de otimização do *beamforming* na *Intelligent Reflective Surface* (IRS) e na estação rádio base sem a necessidade da implantação de elementos ativos na IRS e controle

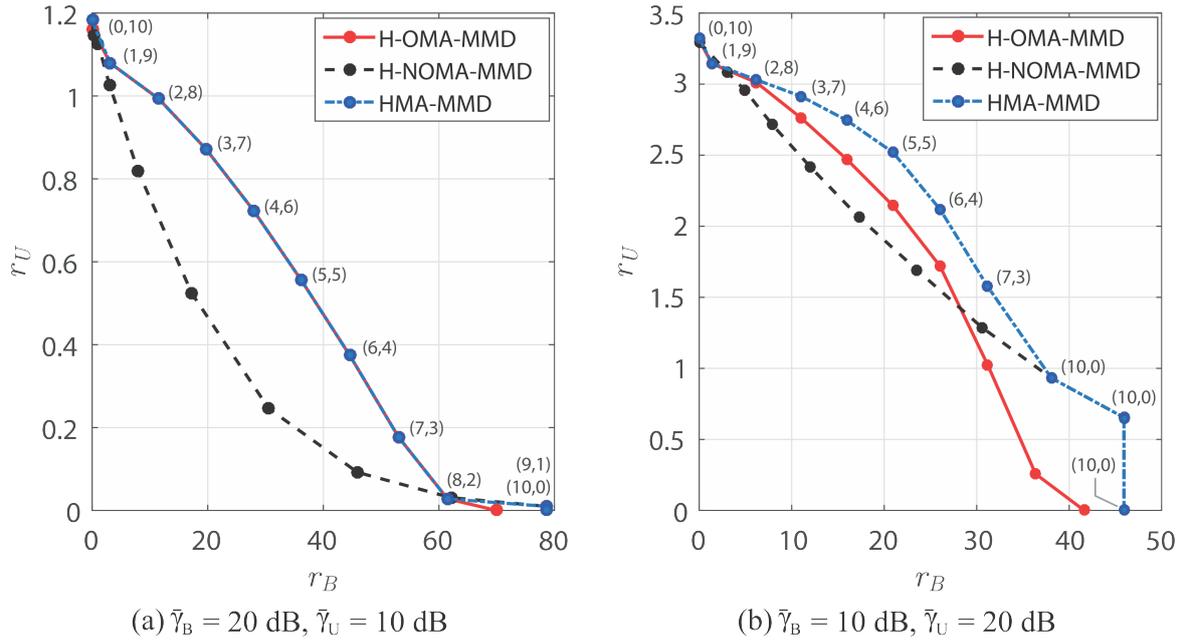


Figura 19: Análise da taxa de dados para eMBB e URLLC com $\epsilon_B = 10^{-3}$, $\epsilon_U = 10^{-5}$, $S = 5$, $a_U = 0.1$ e $F = 10$.

de amplitude separado em cada elemento da IRS. Além disso, a solução proposta mostrou-se aplicável em cenários *Line-of-Sight* (LoS) e *Non-Line-of-Sight* (NLoS) com sobrecarga de treinamento limitada. Ademais, a abordagem proposta introduz uma otimização de *beamforming* conjunta na estação rádio base e na IRS, com base na técnica *Particle Swarm Optimization* (PSO), a qual não depende da aquisição de *Channel State Information* (CSI). Este trabalho teve como objetivo principal minimizar a potência de transmissão na estação rádio base ao mesmo tempo em que atende a um requisito de SNR mínimo.

Durante o desenvolvimento deste trabalho considerou-se o enlace de descida de uma rede móvel celular composta por uma estação rádio base equipada com um arranjo linear de N antenas de transmissão, uma IRS equipada com um arranjo planar de antenas composto por M elementos refletivos e um terminal móvel equipado com uma única antena. Além disso, assumiu-se que não há conhecimento de CSI na estação rádio base e/ou IRS. A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que é possível atingir um desempenho próximo do ótimo, sem a necessidade de aquisição de CSI ou uso de uma cadeia de RF por elemento na IRS, tal como pode ser visto na Figura 20. Além disso, como foi proposto o projeto do *beamforming* na estação rádio base e na IRS sem qualquer conhecimento prévio do CSI, torna-se necessário considerar uma quantidade de dados de realimentação provenientes do usuário, que é dado por $N_{it}L$ (N_{it} representa o número de iterações do PSO proposto e L representa o número de partículas) e adiciona alguma sobrecarga de treinamento para o sistema. Seria de importância prática ter uma quantidade de realimentação do usuário que não fosse maior do que o número de pilotos necessários para estimar o canal, ou seja, $N_{it}L < (MN + 1)$. Portanto, a fim de comprovar a eficiência do método proposto, a Figura 21 apresenta a sobrecarga de treinamento considerando $N = 32$ e $d = 50$ m (d representa a distância entre a estação rádio base e o terminal móvel). Vale ressaltar que, conforme o terminal se afasta da estação rádio base, ele se aproxima da IRS que encontra-se à 51 m da estação rádio base. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que para M grande (IRS com um número elevado de elementos),

a solução proposta atinge um desempenho próximo ao ideal com uma quantidade menor de realimentações do usuário ($N_{it}L$) do que o número de pilotos necessário para estimar o canal, mais especificamente, $N_{it}L = 0,7 \times (MN + 1)$. Além disso, a partir dos resultados, pode-se concluir que para M grande a diferença de desempenho entre o limite inferior e a solução proposta com $N_{it}L = 0,7 \times (MN + 1)$ e até com $N_{it}L = 0,5 \times (MN + 1)$ diminui.

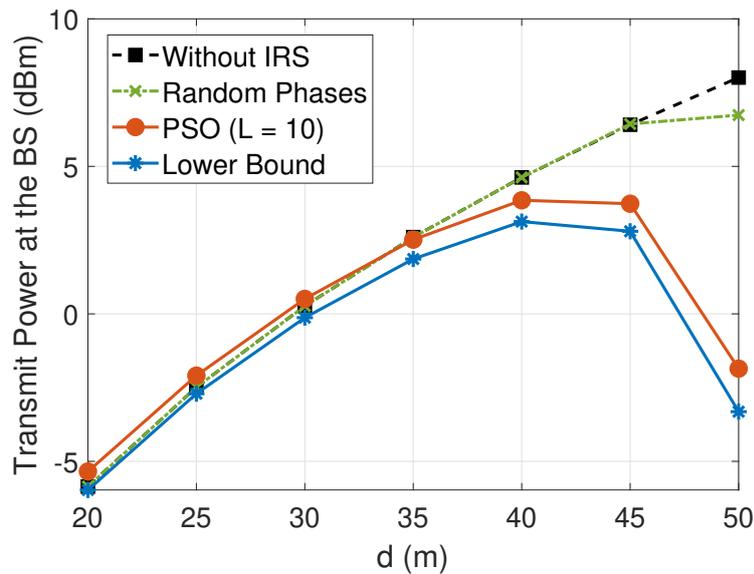


Figura 20: Análise da potência transmitida na estação rádio base com relação a distância entre estação rádio base e terminal móvel considerando o número de elementos na IRS igual a 20.

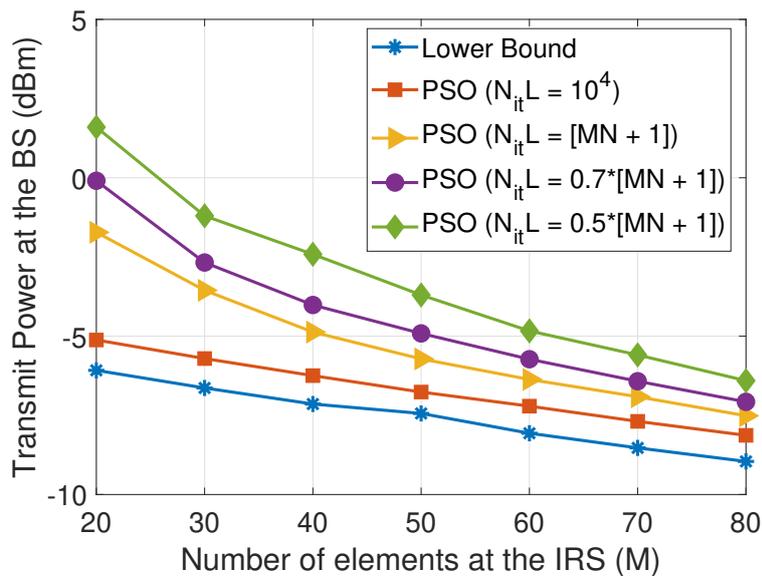


Figura 21: Análise da sobrecarga de treinamento para uma distância de 50 metros entre a estação rádio base e o terminal móvel.

A partir destes resultados foi possível verificar que a solução proposta neste artigo atingiu um desempenho próximo do ideal com uma quantidade razoável de realimentações do terminal

móvel, permitindo o uso de IRS sem a necessidade de uma cadeia de RF por elemento refletor, uma vez que a aquisição do CSI não é necessária, reduzindo custos e consumo de energia.

2.18 IRS-Aided Physical Layer Network Slicing for URLLC and eMBB

As redes 6G suportarão simultaneamente diferentes serviços com base em três tipos diferentes de casos de uso (eMBB, URLLC e *Massive Machine-Type Communications* (mMTC)) com requisitos heterogêneos na mesma infraestrutura de rede da operadora, exigindo, assim, um alto grau de flexibilidade e escalabilidade. Um dos setores que será fortemente impactado pelo desenvolvimento das redes 6G e que apresenta a necessidade de suportar serviços com requisitos heterogêneos na mesma infraestrutura de rede é a indústria. Uma alternativa para acomodar a coexistência de serviços heterogêneos na mesma rede é por meio do paradigma de fatiamento da rede, onde uma rede física é dividida em várias redes virtuais projetadas e otimizadas para suportar serviços específicos e seus requisitos. Além disso, o paradigma de fatiamento de rede permite o compartilhamento de recursos entre serviços ativos com diferentes requisitos.

Apesar das vantagens de se considerar o paradigma de divisão de rede, um dos principais desafios em sistemas de comunicação sem fio é a natureza não determinística dos canais de desvanecimento. Para superar essa dificuldade, as IRSs podem vir a ser densamente implantadas nas redes de comunicação sem fio permitindo que os canais sem fio entre o transmissor e o receptor sejam deterministicamente controlados para melhorar a qualidade do sinal no receptor e a capacidade da rede.

Portanto, em [21], os pesquisadores do projeto Brasil 6G consideraram uma rede de comunicação sem fio na qual múltiplos usuários heterogêneos são atendidos concomitantemente na mesma rede por meio do paradigma de fatiamento de rede. Além disso, em [21] os autores avaliaram abordagens de agrupamento de usuários visando parear usuários URLLC e eMBB e, conseqüentemente, maximizar o desempenho de ambas as estratégias de acesso múltiplo, H-OMA e H-NOMA, conforme pode-se verificar na Figura 23. Tais resultados foram obtidos considerando o sistema apresentado na Figura 22.

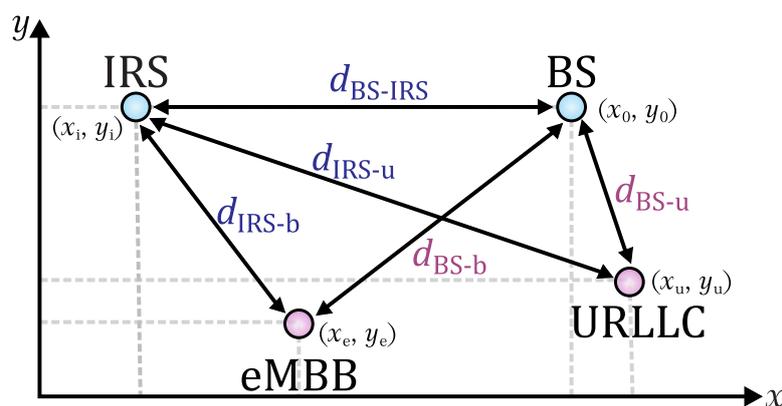


Figura 22: Configuração do sistema e representação das distâncias entre usuários, estação rádio base e IRS.

Portanto, a partir dos resultados em [21], podê-se concluir que a implantação de uma IRS pode aumentar consideravelmente as taxas alcançáveis para o eMBB e URLLC. Além disso, em [21] são fornecidos *insights* sobre a melhor estratégia de agrupamento de usuários, mostrando que a melhor opção é combinar usuários eMBB próximos à IRS com usuários URLLC próximos

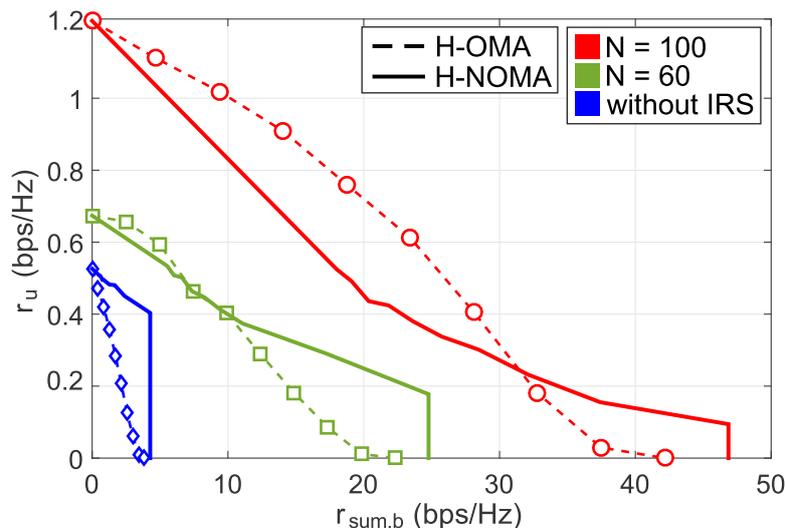


Figura 23: Análise da taxa de dados considerando $N \in \{60, 100\}$ e $(x_u = 10, y_u = 0)$ m e $(x_b = 15, y_b = 0)$ m.

à estação rádio base, pois, neste caso, os usuários eMBB podem atingir uma alta taxa de dados garantindo alta confiabilidade enquanto atinge-se uma taxa de dados considerável para o usuário URLLC.

2.19 Direct-to-Satellite IoT Slotted Aloha Systems with Multiple Satellites and Unequal Erasure Probabilities

O uso de comunicações via satélite para soluções IoT têm atraído muita atenção da indústria e da academia recentemente, como uma alternativa promissora para a cobertura em grande escala de um grande número de dispositivos IoT, mostrando que a integração das redes terrestre e satelital será uma das características das redes 6G. Em [22], os pesquisadores do projeto Brasil 6G consideraram que um *cluster* de dispositivos IoT está sob a cobertura de uma constelação *Low Earth Orbit* (LEO), conforme apresentado na Figura 24. Ademais, considera-se que a técnica *Slotted Aloha* é usada como uma técnica de controle de acesso ao meio.

Em [22], os autores apresentaram uma análise da taxa de transferência (Figura 25) e da taxa de perda de pacotes (Figura 26) considerando probabilidades de apagamento potencialmente diferentes em cada um dos satélites visíveis dentro da constelação. Através dos resultados, comprovou-se que diferentes combinações de probabilidades de apagamento nos LEOs em conjunto com diferentes cargas de tráfego de IoT podem levar a diferenças consideráveis no desempenho do sistema. Além disso, foi possível concluir que a vazão do sistema e a taxa de perda de pacotes dependem da carga de tráfego oferecida pelos dispositivos IoT e das probabilidades de apagamento do enlace de subida nos satélites. Ademais, verificou-se que as probabilidades de apagamento nos satélites em cada iteração dependem da posição dos satélites dentro da constelação. Conseqüentemente, pode-se deduzir que a carga de tráfego ideal, em termos de taxa de transferência do sistema, para cada posição da constelação de satélites não é a mesma. Com base nesse fato, pode-se prever que uma distribuição de carga de tráfego não uniforme deve superar a distribuição de carga de tráfego uniforme em termos de rendimento médio do sistema.

Portanto, em [22] foi proposta uma estratégia de distribuição inteligente de carga de tráfego

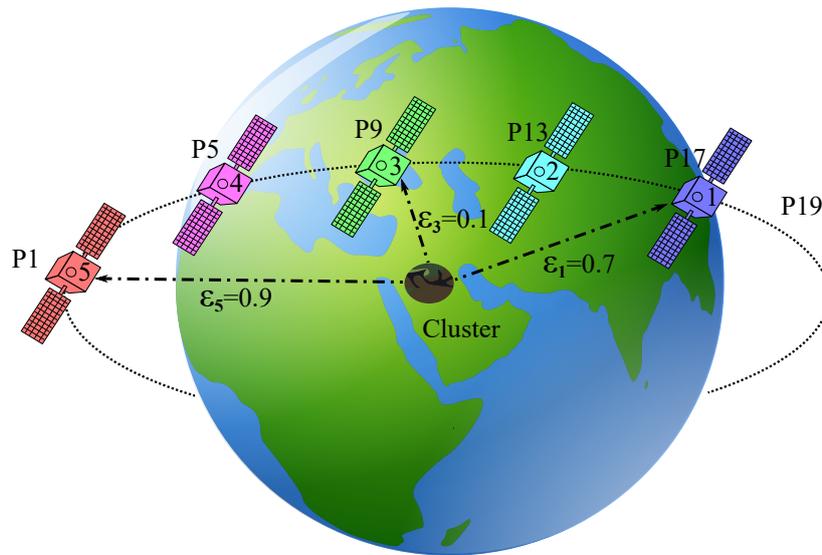


Figura 24: Topologia do modelo de sistema: $K = 5$ satélites com diferentes probabilidades de eliminação ε para um espaçamento de $s = 4$ posições entre satélites consecutivos. A imagem corresponde à posição 17th do Sat_1 .

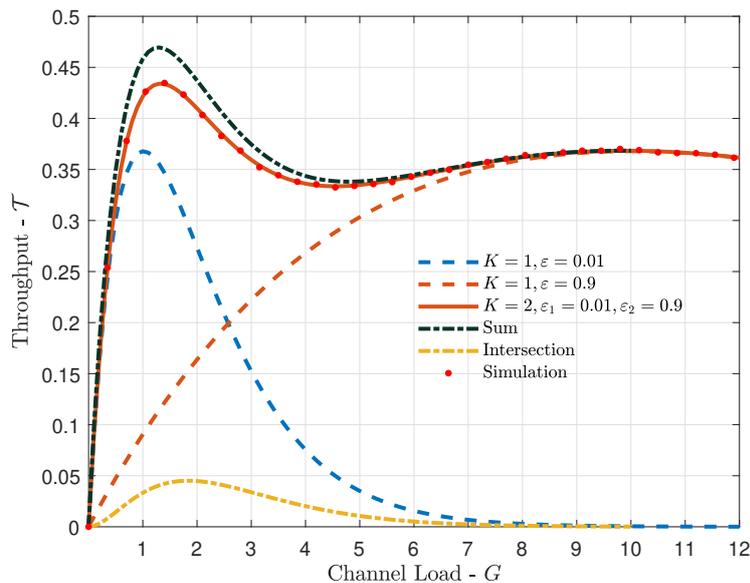


Figura 25: Taxa de transferência geral alcançada com distribuição de carga de tráfego uniforme e não uniforme $G_T = 180$ vs o número de satélites K no sistema

que, ao escolher entre uma alocação não uniforme e a distribuição uniforme de carga de tráfego, garante um alto rendimento geral do sistema, ao alocar quantidades mais adequadas de carga de tráfego em diferentes posições, ou seja, diferentes conjuntos de probabilidades de apagamento da constelação LEO em relação ao *cluster* IoT. Por fim, a partir dos resultados apresentados na Figura 27 verificou-se que, a estratégia com baixa complexidade de implementação proposta em [22], permite que o sistema seja muito mais escalonável, explorando de forma inteligente o potencial das diferentes posições da constelação de satélites.

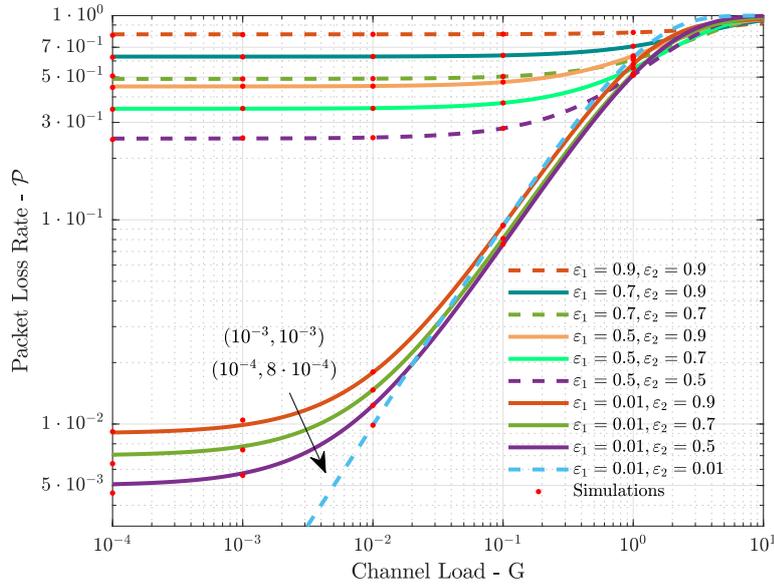


Figura 26: Taxa de perda de pacotes \mathcal{P} vs Carga do canal G para $K = 2$ satélites e diferentes pares de probabilidades de eliminação $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$, no caso de baixa carga do canal.

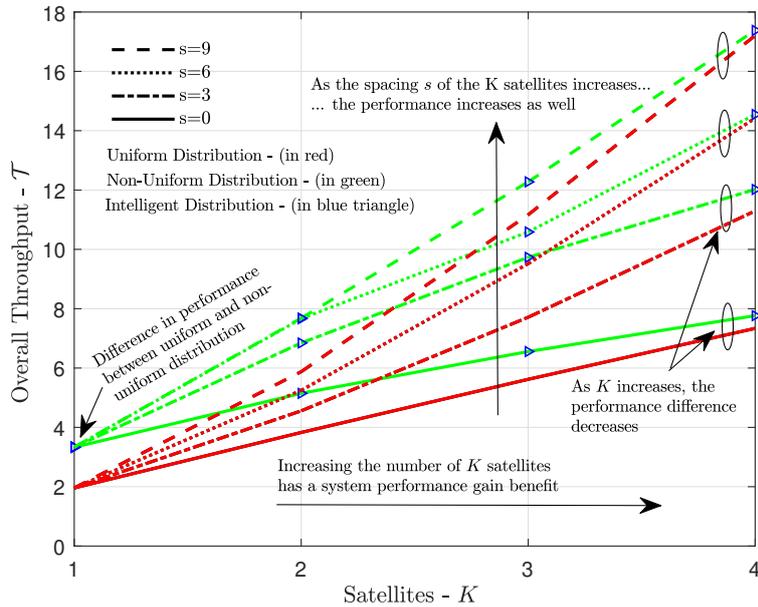


Figura 27: Taxa de transferência alcançada com distribuição de carga de tráfego uniforme e não uniforme $G_T = 180$ vs número de satélites K no sistema.

2.20 Rate-Splitting Multiple Access for URLLC Uplink in Physical Layer Network Slicing with eMBB

À medida que a implantação da tecnologia 5G em todo o mundo evolui, fica evidenciado o quão desafiadores são os três serviços genéricos englobados por tal tecnologia, a saber, eMBB, URLLC e mMTC. Para permitir a coexistência desses serviços heterogêneos com diversos re-

quisitos dentro de uma mesma arquitetura de RAN, foi proposto o conceito de fatiamento de rede, que divide a rede em sub-redes lógicas e físicas geralmente com requisitos customizados em termos de latência, eficiência energética, mobilidade, conectividade massiva e *throughput*, visando garantir requisitos mínimos de desempenho e isolamento. Isso pode ser realizado graças à *softwarization* e virtualização da rede, sendo considerado o principal habilitador do *Resource as a Service* (RaaS) para as redes 6G. No caminho para os sistemas de comunicação sem fio 6G, é razoável supor que os três serviços heterogêneos poderiam ser divididos em sub-serviços ou mesmo combinados, surgindo novas classes de serviço. Esses serviços requerem métodos robustos de acesso múltiplo que podem combinar maior eficiência espectral com requisitos estritos de atraso e confiabilidade para atender a aplicações como direção totalmente automatizada, onde a cooperação entre carros para evitar colisões é vital. Para enfrentar o enorme problema de conectividade, em [23] os pesquisadores do projeto Brasil 6G investigaram o problema de coexistência de serviço heterogêneo no escopo das redes 6G, onde vários usuários URLLC e eMBB estão conectados a uma estação rádio base comum, compartilhando recursos da rede física. Em contraste com o OMA e o NOMA, geralmente adotado na literatura, neste trabalho foi empregado o *Rate-Splitting Multiple Access* (RSMA) para transmissão URLLC, onde um dispositivo URLLC divide sua mensagem em duas sub-mensagens com potência parcial de transmissão, potencialmente recuperadas na estação rádio base por meio do *Successive Interference Cancellation* (SIC).

No esquema proposto em [23], denominado U-RSMA, combina-se os benefícios de RSMA, decodificação SIC e diversidade de frequência, tanto no fatiamento OMA quanto no NOMA para usuários eMBB visando maximizar a eficiência espectral do URLLC e permitir o compartilhamento não ortogonal de recursos de frequência e tempo por meio de *rate-splitting* para usuários URLLC. Ademais, o esquema U-RSMA proposto é então comparado aos esquemas U-NOMA e U-OMA, onde o acesso múltiplo entre dispositivos URLLC é realizado por meio de NOMA e OMA, respectivamente. Para caracterizar o desempenho dos usuários eMBB e URLLC, os autores avaliaram a taxa de dados para cada serviço em diferentes cenários. Como resultado, verificou-se que, em geral, o RSMA apresenta um melhor desempenho em termos de taxa de soma e confiabilidade, mesmo quando transmitindo simultaneamente para usuários eMBB (Figura 28). Além disso, através dos resultados apresentados em [23] verificou-se que a taxa de soma URLLC pode ser aumentada ajustando adequadamente o fator de divisão de taxa com base na SNR média, não sendo necessária qualquer conhecimento do CSI na estação rádio base. Logo, pode-se verificar que a combinação do U-RSMA e do NOMA é uma ferramenta poderosa para atender às futuras demandas da rede 6G.

2.21 *Deep Neural Network Parameterization for Channel Estimation in MUSA Systems*

Uma das principais características das redes 6G é o uso massivo de IA em suas diversas camadas. No entanto, a especificação dos hiperparâmetros de uma rede neural não é trivial e diferentes parametrizações podem levar a resultados de desempenho diversos. Em [24], os pesquisadores do projeto Brasil 6G analisaram o efeito da configuração dos hiperparâmetros de uma rede neural profunda em um caso específico, que consiste em obter uma estimativa de canal em um sistema *Multi-User Shared Access* (MUSA), visando diminuir a propagação do erro de estimativa no algoritmo SIC.

Um dos maiores desafios ao trabalhar com redes neurais é definir qual a melhor configuração do modelo. Os hiperparâmetros são variáveis cujos valores são ajustados para controlar o

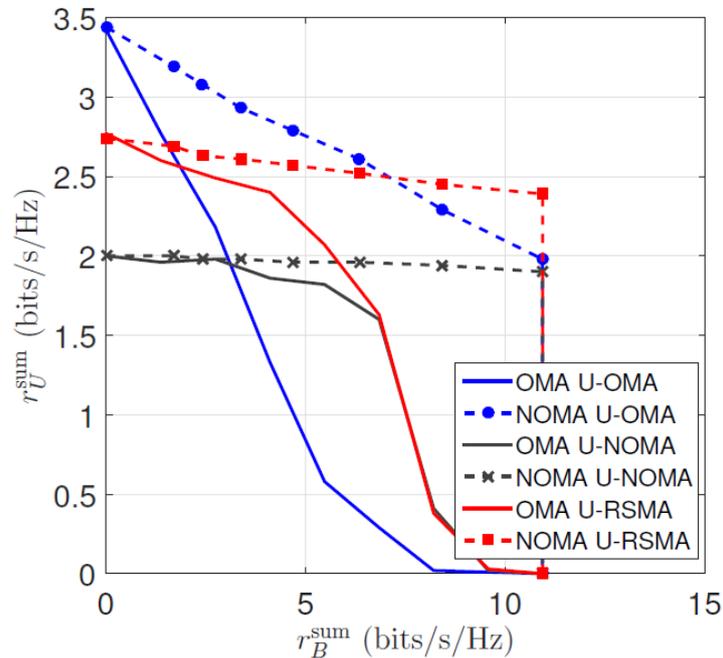


Figura 28: Análise da taxa de dados no URLLC e eMBB para os OMA e NOMA e considerando o URLLC sobre os esquemas U-OMA, U-NOMA, e U-RSMA. $\bar{\Gamma}_U = 20$ dB, $\bar{\Gamma}_B = 10$ dB, $\epsilon_U^{\text{U-OMA}} = 10^{-5}$, $\epsilon_U^{\text{U-NOMA}} = \epsilon_U^{\text{U-RSMA}} = 5 \times 10^{-6}$, $\epsilon_B = 10^{-3}$, $a_U = 1$, $F = 8$, $S = 5$, $n_U = 2$ e α otimizado.

processo de aprendizagem. Em outras palavras, os hiperparâmetros são as variáveis que determinam a estrutura do modelo e como ele é treinado. O número de camadas ocultas e a taxa de aprendizado são dois exemplos de hiperparâmetros que precisam ser especificados para as redes neurais. Além de afetar o desempenho da rede neural na sua função fim, a escolha de hiperparâmetros afeta a velocidade e a qualidade do processo de aprendizagem.

Os algoritmos de aprendizado de máquina costumam exibir estocasticidade inerente ao aprendizado, que pode ser induzida pela aleatoriedade presente, por exemplo, na coleta de dados, na ordem em que os exemplos são expostos ao modelo, na inicialização de pesos em uma *Deep Neural Network* (DNN) e abordagens de re-amostragem. A aleatoriedade é uma parte importante de muitos algoritmos de aprendizado de máquina, mas também se posta como um obstáculo à reprodutibilidade dos resultados.

Em [24] foram apresentados os principais hiperparâmetros de uma rede neural, incluindo o número de camadas escondidas, número de neurônios por camada escondida e taxa de aprendizagem, e as boas práticas que podem auxiliar a escolha dessas configurações, encontradas através de estudos e dos resultados alcançados. Também foi analisado o desempenho da rede neural na melhoria da estimativa do CSI sob diferentes configurações de hiperparâmetros e sementes de inicialização. O CSI tem um alto impacto no desempenho do sistema MUSA, pois a estimativa de canal pobre reduz a capacidade do SIC de remover a interferência multiusuário do sinal recebido.

Devido à aleatoriedade presente na DNNs, conforme mencionado anteriormente, as sementes para o gerador de números aleatórios foram definidas no *NumPy* e *Tensorflow*, tornando os modelos reprodutíveis e facilitando a comparação do efeito de ajuste de cada hiperparâmetro. Além disso, o desempenho médio é calculado através da repetição aleatória do algoritmo de

aprendizagem para diferentes arquiteturas DNN propostas. Nas Figs. 29, 30 e 31, o desempenho foi avaliado considerando os dois valores para a semente e a média de 30 execuções aleatórias do algoritmo de aprendizagem, ou seja, o treinamento e o teste da rede neural foi executado 30 vezes sem valores fixos para as sementes. Isso garantiu a cada execução do algoritmo de aprendizagem que os conjuntos de treinamento e validação fossem diferentes e que os pesos fossem inicializados aleatoriamente.

A Fig. 29 mostra o desempenho do estimador DNN em termos de MSE sob diferentes SNRs e arquiteturas DNN com 1, 2 e 3 camadas ocultas. A Fig. 30 mostra o desempenho da estimativa DNN em termos de MSE sob diferentes SNRs e arquiteturas para DNN, com uma camada oculta e diferentes quantidades de neurônios na camada oculta variando em 12, 24 e 32. O desempenho do estimador DNN para taxas de aprendizagem iguais a 0,001 e 0,01 é mostrado na Fig. 31. Finalmente, a Fig. 32 mostra os desempenhos médios de 30 execuções aleatórias do algoritmo de aprendizagem para três arquiteturas DNN diferentes que resultam em bom desempenho da estimativa DNN com baixa complexidade de treinamento. Assim, o ajuste adequado dos hiperparâmetros leva a bons resultados de desempenho com custo da computacional adequado para a tarefa em questão. Todos os resultados mostraram que a DNN é capaz de melhorar a estimativa de CSI inicial, obtida através do algoritmo de *Least Squares* (LS).

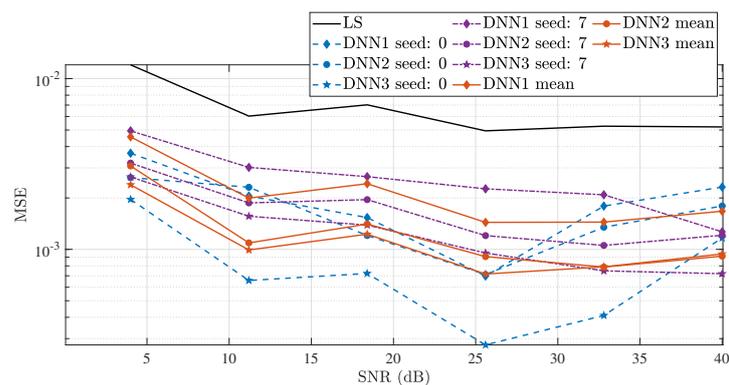


Figura 29: Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação *online*, sob diferentes ajustes no número de camadas ocultas.

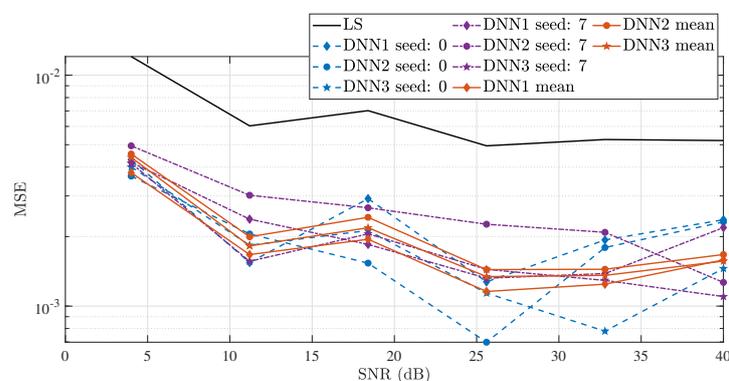


Figura 30: Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação *online*, sob diferentes ajustes no número de neurônios por camada oculta.

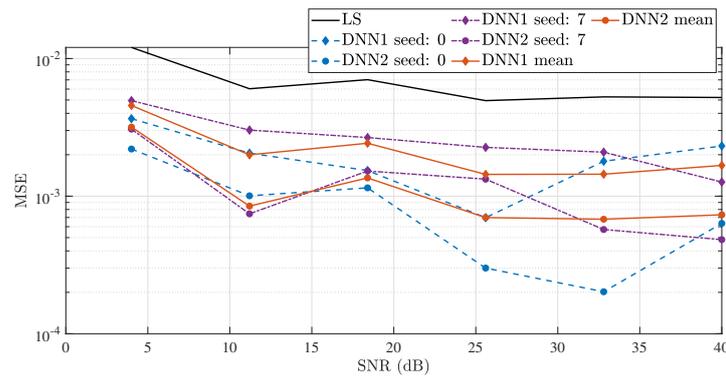


Figura 31: Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação *online*, sob diferentes ajustes na taxa de aprendizagem.

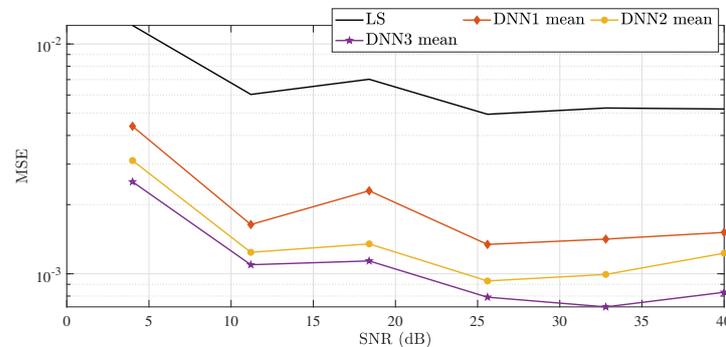


Figura 32: Desempenho do estimador baseado em DNN na fase de implementação *online*, sob diferentes arquiteturas de DNN.

Além disso, por meio dos resultados, foi possível perceber que o desempenho da rede neural pode mudar dependendo do valor da semente. Portanto, para uma análise mais precisa dos resultados, o algoritmo de aprendizado deve ser executado algumas vezes, e o resultado médio dessas execuções deve ser considerado.

2.22 Low-Complexity Detectors Applied to FTN-GFDM Systems

A eficiência espectral das redes 6G precisa aumentar de forma significativa para viabilizar o tráfego do alto volume de dados previstos para as futuras aplicações. O uso de *massive* MIMO (mMIMO) e *Ultra Dense Networks* (UDN) permite o aumento de capacidade em áreas densamente povoadas, mas não são tecnologias adequadas para o atendimento de áreas remotas e rurais. Nestes cenários, é necessário aumentar a eficiência espectral da forma de onda e a combinação da técnica *Faster-than-Nyquist* (FTN) com o *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM) vem se mostrando ser uma solução promissora.

Ligeiras modificações na definição da grade de tempo-frequência permitem incluir a sinalização FTN ao GFDM, melhorando a eficiência espectral do sistema. O desafio na recepção da forma de onda FTN-GFDM reside na alta complexidade necessária para detectar o sinal, uma vez que receptores lineares têm desempenho insuficiente para atender a *Quality of Service* (QoS) das futuras aplicações. Para reduzir a perda de desempenho em termos de BER, o receptor deve ser capaz de eliminar as interferências inerentes do processo de modulação. O detector *Maximum Likelihood Sequence Estimation* (MLSE) pode resolver a interferência sem

causar penalidades no desempenho em termos de BER. No entanto, o MLSE requer uma pesquisa exaustiva de todas as combinações possíveis de símbolos transmitidos, o que leva a uma complexidade proibitiva em cenários práticos.

Em [25], os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram o uso de detectores de baixa complexidade computacional baseados em estimação de sequências para recuperar os bits de dados em um sistema FTN-GFDM. Os algoritmos *Sphere Detector* (SD), *Successive Symbol-by-Symbol Sequence Estimator* (SSSSE), *Successive Symbol-by-Symbol with go-back K Sequence Estimator* (SSSgbKSE) e *Frequency-Domain Equalization* (FDE) são estendidos ao cenário de formas de onda não ortogonais com compressão nos domínios do tempo e da frequência.

Dentre os detectores analisados, o SD apresentou o melhor desempenho com um custo computacional razoável. O princípio do algoritmo SD é limitar o espaço de busca em uma esfera multidimensional, procurando apenas soluções candidatas que estejam dentro de um raio ρ ao redor do vetor recebido \mathbf{r} . Claramente, se o candidato mais próximo dentro da esfera também é o candidato mais próximo em todo o espaço de busca, então o SD alcança a solução ótima com complexidade menor que o MLSE. Para que um candidato esteja dentro da esfera do raio ρ , é necessário que

$$\arg \min_{\hat{\mathbf{d}} \in \xi^N} \left\| (\mathbf{A}^H)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{d}}) \right\|^2 \leq \rho^2, \quad (1)$$

onde \mathbf{A}^H é a matriz de transmissão do FTN-GFDM, $\mathbf{G} = \mathbf{A}^H \mathbf{A}$ é a matriz de interferências, \mathbf{r} é o vetor de amostras recebidas na saída do filtro de recepção e $\hat{\mathbf{d}}$ é o vetor de dados candidato. A complexidade do SD depende do raio de pesquisa inicial, de uma estimativa inicial e, conseqüentemente, da SNR. No pior cenário, SD atingirá a complexidade MLSE, mas no geral, assumindo valores práticos de SNR, a complexidade do detector SD é várias ordens de grandeza inferior à complexidade do MLSE.

2.23 Blockchain Applied to Vehicular Odometers

As futuras redes móveis terão que lidar com um número massivo de dados provenientes de diversas fontes de informação e como várias decisões serão tomadas por algoritmos de IA treinados com estes dados, é essencial garantir a segurança e confiabilidade da fonte.

Em [26], os pesquisadores do projeto Brasil 6G aplicaram a *Blockchain* para garantir a autenticidade dos dados registrados em odômetros veiculares, já visando o cenário de integração de carros autônomos e redes móveis de próxima geração. Os requisitos técnicos de qualquer para garantir a autenticidade dos dados oriundos de odômetros passam pelo registro perene, seguro e imutável dos dados veiculares. Tais requisitos levantam imediatamente a questão de como o uso da tecnologia *Blockchain* poderia ser vantajosa para esse propósito.

O *Blockchain* é uma tecnologia de banco de dados baseada em registros distribuídos que é compartilhado pelas partes para validar e armazenar imutavelmente as transações trocadas por meio de redes de comunicação [26]. O consenso sobre conjuntos de transações é obtido por nós distribuídos, que votam para validar a versão correta do banco de dados, garantindo a persistência e imutabilidade das informações ao mesmo tempo em que proporcionam consolidação de dados sem confiança. A sequência de transações é agrupada em blocos, que são encadeados de acordo com um conjunto estrito de regras.

A versão atual da tecnologia de registros distribuídos é armazenada pelos nós da rede, onde cada bloco é criado em intervalos pré-definidos de forma descentralizada por meio de um algoritmo consensual. O bloco consiste em um índice, uma referência ao *hash* do bloco

anterior, os dados que ele está armazenando e seu próprio *hash*, que é criado com base em todos os atributos mencionados.

Nesse cenário, os pesquisadores propõem uma arquitetura de *Blockchain* para o combate à fraude em odômetros de automóveis [26]. As vantagens desta abordagem são as seguintes: (i) evitar a reversão ou adulteração do histórico do odômetro; (ii) o consenso de validade ao redor do nó garante a precisão das informações que estão sendo registradas; (iii) o histórico dos odômetros dos veículos é armazenado de forma descentralizada, tornando o acesso às informações seguro, distribuído e naturalmente consistente e; (iv) a negação de serviço pode ser mitigada com o emprego de vários nós mestres.

2.24 *Towards Future Internet of Things Experimentation and Evaluation*

A rede 6G contará com o uso de dispositivos IoT para garantir a integração total entre objetos, seres humanos e máquinas. Infelizmente, no atual modelo de camadas do IoT, os padrões IETF e IEEE têm enfrentado limitações ao exigir que os aplicativos superem suas próprias restrições, estreitando todo o potencial desse conceito. Como exemplo, o modelo de camadas em vigência não aborda ou suporta inteiramente nomenclatura perene, proveniência de dados imutáveis, responsabilidade de dados, suporte de mobilidade e auto-organização de serviços. Sendo assim, os pesquisadores do projeto Brasil 6G investigaram em [27] a *Future Internet Architecture* (FIA) como um candidato viável para compensar essas lacunas. Independentemente do modelo proposto pela FIA, este campo carece de um ambiente adequado que permita avaliar o desempenho de protocolos e arquiteturas distintas de forma justa e transparente. Neste trabalho, os pesquisadores combinaram tecnologias para explorar funcionalidades de *containers* Docker, sistema operacional de código aberto Contiki para IoT e o simulador de rede Cooja IoT, promovendo um ambiente de experimentação e avaliação para os FIAs.

Assim, os pesquisadores projetaram um novo ambiente de experimentação e avaliação da IoT do Futuro (FIoTE3), com base em uma solução de baixo custo e código-fonte aberto. O ambiente proposto integra tecnologias de contêineres, emulação de nós IoT e simulação de rede para avaliar a pilha IoT atual e uma abordagem FIA promissora chamada *eXpressive Internet Architecture* (XIA). O ambiente desenvolvido foi aplicado em dois cenários individuais: (i) que trata da configuração híbrida XIA e *Internet Protocol version 6* (IPv6) com *gateway* XIA e protocolos *eXpressive Datagram Protocol* (XDP) e *eXpressive Internet Protocol* (XIP) para IPv6 e IPv6 *over Low-Power Wireless Personal Area Networks* (6LoWPAN), oferecendo suporte a serviços XIA interoperáveis em *motest* IoT legados; e (ii) que trata de uma rede *User Datagram Protocol* (UDP)/IPv6 e UDP/IPv6/6LoWPAN com *motest* e serviços IoT emulados. A performance do ambiente proposto foi analisada para os dois cenários em termos do atraso total, do uso da unidade de processamento e da perda de pacotes. Os resultados indicaram que a performance do protótipo da XIA é semelhante ao ambiente UDP/IPv6 e UDP/IPv6/6LoWPAN.

Diante dos resultados, os pesquisadores constataram a viabilidade e eficácia da abordagem XIA, ampliando este campo e semeando um caminho para trabalhar com outras FIAs. Além disso, os autores frisaram a necessidade da substituição da pilha TCP/IP para o desenvolvimento da próxima geração de forma que a suportar infraestruturas compartilhadas por várias arquiteturas distintas e especializadas.

2.25 *Cyber-Physical Systems Architectures for Industrial Internet of Things*

O cenário industrial está passando por mudanças significativa, principalmente, devido ao surgimento de novas tecnologias e ao crescimento da demanda. Como consequência, o número de dispositivos e sistemas de processamento nas arquiteturas das indústrias também está aumentando. Conectividade de entidades, funcionamento conjunto físico/virtual, interatividade, interoperabilidade, auto-organização, tomada de decisão inteligente, entre outros fatores são fundamentais para fomentar o potencial da Indústria 4.0 (I4.0) e das redes 6G. Neste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G consideraram em [28] que o *Cyber-Physical Systems* (CPS) e a *Industrial Internet-of-Things* (IIoT) terão um papel importante no I4.0 emergente. Os especialistas em indústrias estão explorando essas tecnologias para acompanhar a transformação digital, desenvolvendo sistemas IIoT e arquiteturas CPS capazes de conectar dispositivos de rede de diferentes sistemas de comunicação e tecnologia da informação, virtualizando as empresas e integrando-as com outros setores de manufatura e empresas.

Assim, os pesquisadores realizaram um levantamento abrangendo os principais modelos de arquitetura CPS disponíveis no ambiente industrial, enfatizando suas principais características e tecnologias, bem como as correlações entre elas, apontando objetivos, vantagens e contribuições para a introdução da IIoT em I4.0. Ainda, os pesquisadores identificaram lacunas e limitações para melhorias nas arquiteturas. Possíveis sugestões para integração vertical e horizontal dos trabalhos do CPS também foram feitas. Devido à importância da indústria na economia, essas ideias podem contribuir para o desenvolvimento de países com economias em crescimento, agregando à sociedade melhorias em processos, produtos e geração de valor. Como destaque, pode-se notar a necessidade de implementar *Cloud Computing* e *Big Data* de forma mais ampla, ao mesmo tempo em que aborda os requisitos I4.0 para enormes fluxos de dados gerados por enxames de dispositivos IIoT. Também é necessária a introdução de tecnologias e conceitos para integração vertical e industrial I4.0, como orquestração rica em semântica e Gêmeos Digitais para modelagem de dados e representação de dispositivos com base em identificadores únicos. Além disso, a cibersegurança é um desafio para garantir a privacidade dos usuários e dos dados industriais.

Por fim, os pesquisadores constataram que outras tecnologias de tendência devem ser incluídas no projeto da arquitetura de referência I4.0 e nos trabalhos de CPS, como redes de sensores, *Blockchain* e FIA, para que os CPSs industriais acompanhem os desenvolvimentos tecnológicos. Além disso, deve ser explorada uma solução de padronização mais clara e unificada, capaz de garantir a interoperabilidade entre os diferentes sistemas industriais.

2.26 *Cooperative Full-Duplex V2V-VLC in Rectilinear and Curved Roadway Scenarios*

Nas redes 6G, várias tecnologias irão ser consideradas para habilitar o conceito da Internet de Tudo, na qual possibilitará conexões inteligentes entre pessoas, processos, dados e coisas. Dentre estas tecnologias, o *Visible Light Communication* (VLC) tem se destacado para aplicações em redes V2V. Neste caso, a comunicação ocorre com uso de faróis dos carros e fotodetectores. Para que a comunicação com luz visível entre veículos se torne uma realidade, é necessário superar alguns desafios como a possível queda da comunicação na ausência de linha de visada entre os sensores dos veículos causadas na passagem por curvas ou na obstrução por outros veículos e objetos. Assim, os pesquisadores do projeto Brasil 6G analisaram em [29] a comunicação com

luz visível entre dois carros que se movem ao longo de diferentes cenários rodoviários, sendo: (i) uma via retilínea de múltiplas faixas e (ii) uma via curvilínea de múltiplas faixas. Foi avaliada a cooperação por meio de um terceiro veículo na entrega das mensagens. Os cenários de aplicação estão ilustrados nas Figuras 33 e 34, na qual θ_d representa o ângulo formado entre os veículos assim que um deles entre em uma curva.

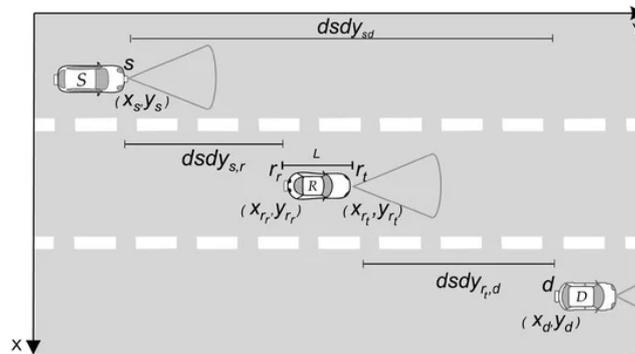


Figura 33: Esquema de uma rede cooperativa V2V-VLC com um veículo retransmissor intermediário

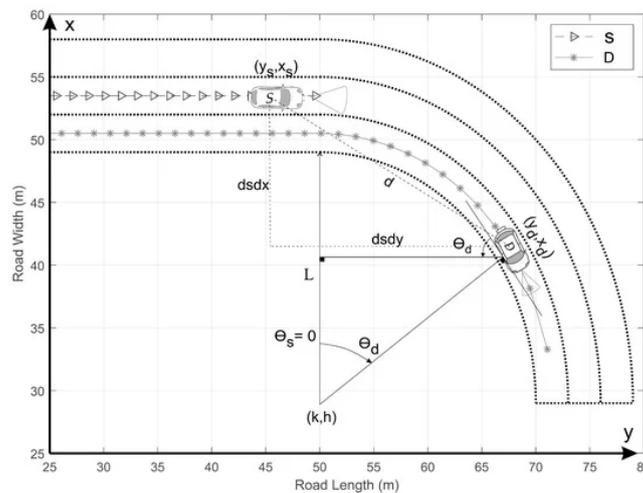


Figura 34: Esquema de comunicação para dois carros usando V2V-VLC ao longo de uma curva.

A Figura 35 avalia a taxa de erro de bit e o respectivo ângulo Θ_d em função da posição do veículo fonte ao longo do cenário da Figura 34. Na Figura 35, é possível observar a comunicação entre os dois veículos até aproximadamente $\theta_d = 20^\circ$, na qual o carro destino entrou na curva.

Ao acrescentar um terceiro carro na mesma pista do veículo destino, conforme ilustrado na Figura 36, a comunicação entre os veículos fonte e destino poderá ser estendida. Para avaliar os efeitos dessa cooperação, foram analisadas a taxa de erro de bit em função da distância entre os veículos fonte e retransmissor para diferentes valores do ângulo θ_d , conforme representado na Figura 37. Neste caso, foi possível observar a viabilidade da comunicação, inclusive, para $\theta_d = 40^\circ$, anteriormente considerado um cenário improvável sem a cooperação. Diante destes resultados, os pesquisadores concluíram que a adoção de um sistema cooperativo VLC poderá se estender e abrigar uma quantidade maior de retransmissores, evitando a interrupção da comunicação em cenários reais de estradas curvilíneas.

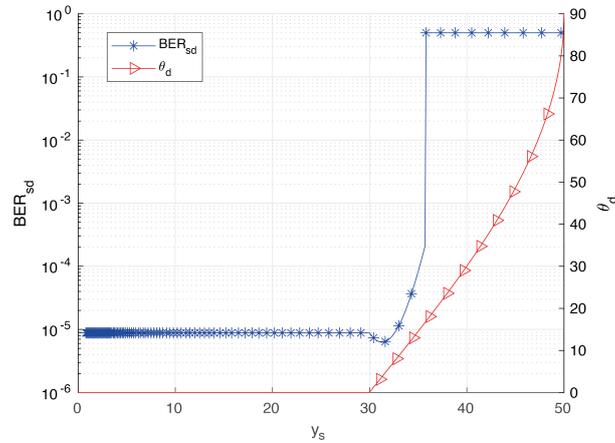


Figura 35: Taxa de erro de bit e θ_d em função da posição do veículo fonte ao longo do cenário para a comunicação V2V-VLC entre S e D .

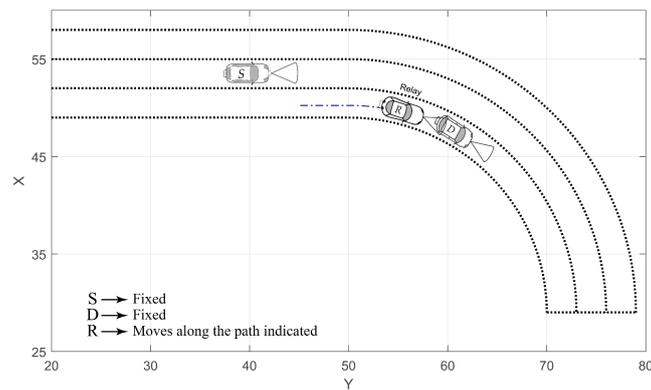


Figura 36: Esquema da comunicação cooperativa ao longo de uma via curvilínea. D é considerado fixo em diferentes posições angulares, enquanto R segue o caminho traço-ponto entre S e D .

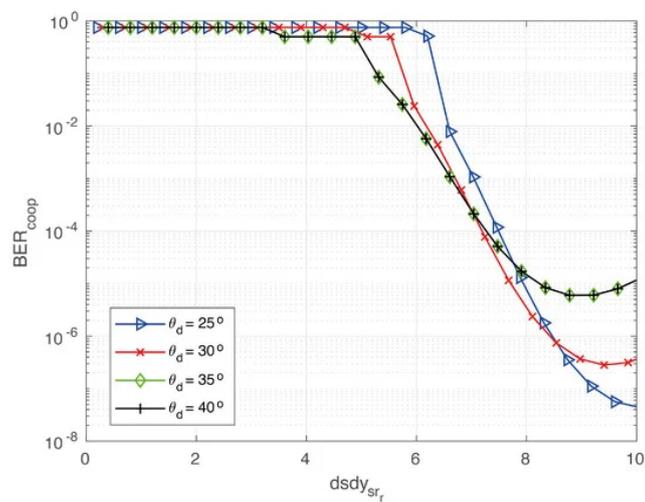


Figura 37: Taxa de erro de bit cooperativa em função da distância entre os veículos fonte e retransmissor para diferentes valores de ângulos θ_d .

3 Contribuições do Transceptor

Além das pesquisas apresentadas na seção anterior, a equipe do projeto Brasil 6G tem participado ativamente no desenvolvimento de um sistema capaz de executar a RAN em tempo real. Esta solução explora diversas tecnologias das camadas física e de enlace, aplicando-as a sistemas de *Software-Defined Radio* (SDR). A utilização deste recurso permite utilizar linguagens de programação de alta performance sem se preocupar com a especificação ou o desenvolvimento de hardwares exclusivos para esta finalidade. Esta nova plataforma foi baseada no transceptor implementado em [30], cujo objetivo era prover o acesso a Internet em áreas remotas e rurais. No contexto do atual projeto, a antiga plataforma foi aprimorada para atender algumas propostas inerentes à rede 6G. Para tal, os pesquisadores implementaram novas soluções que permitirão aumentar o número de usuários simultâneos e viabilizar o emprego de recursos de IA. Um breve histórico do desenvolvimento do transceptor e as contribuições da nova plataforma serão apresentadas a seguir.

3.1 Evolução do Transceptor

A versão original do transceptor foi desenvolvida ao longo da execução do projeto 5G IoT pela equipe do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Inatel cuja finalização ocorreu em 2020 [30]. O objetivo deste projeto foi desenvolver uma solução de baixo custo para prover conectividade em áreas remotas e rurais. Assim, a equipe do CRR projetou, especificou e desenvolveu a solução do transceptor, denominada de 5G-IoT. Este projeto foi executado em quatro metas. Na Meta 1, a concepção do 5G-IoT foi orientada por uma pesquisa sobre demandas e aplicações emergentes para o agronegócio e áreas remotas [31]. Ao definir as aplicações e as demandas fundamentais para o agronegócio brasileiro, foi possível estabelecer os requisitos técnicos para a implementação da solução do transceptor 5G-IoT. As soluções tecnológicas para a implementação da *Physical layer* (PHY) e da *Medium Access Control* (MAC) foram propostas durante a execução da Meta 2 do projeto [32]. A implementação da solução foi, por sua vez, realizada durante a execução da Meta 3 [33]. Uma prova de conceito da solução desenvolvida foi demonstrada a partir de uma rede piloto, chamada de rede 5G-IoT piloto, conforme previsto na Meta 4 [34]. Por meio da prova de conceito, pode-se demonstrar as funcionalidades principais da solução concebida e desenvolvida, destacando a sua capacidade de viabilizar um conjunto de serviços de IoT aplicáveis em áreas remotas e rurais.

A Figura 38 ilustra o diagrama de blocos da rede 5G-IoT, operando em um cenário com suporte às principais aplicações para o agronegócio brasileiro [35]. Nesta rede, o terminal de usuário pode estar localizado em uma fazenda remota onde serão viabilizadas diferentes aplicações de IoT. Para a demonstração foram consideradas as seguintes aplicações: (i) monitoramento de condições de solo e de condições climáticas; (ii) monitoramento de maquinário agrícola, viabilizada pela integração com a tecnologia LoRa; (iii) monitoramento de rebanhos, viabilizados pela integração com solução comercial do padrão Sigfox; (iv) monitoramento e atuação em culturas através do uso de drones; e (v) acesso à Internet para fins de sensoriamento, atuação remota, ou uso da rede de maneira geral. Maiores detalhes sobre o *set-up* de demonstração da rede 5G-IoT, dispositivos, aplicações e funcionalidades suportadas estão apresentados em [30].

O terminal do usuário implementado na rede 5G-IoT possui uma interface Ethernet que pode fornecer conexão para a estrutura de rede na fazenda. Conforme ilustrado na Figura 38, essa interface é conectada a um *switch* de rede onde são interligados diferentes equipamentos

provedores de serviços de IoT. A estação rádio base, por sua vez, pode estar localizada em uma distância de até 50 km da fazenda e prover, nesta condição, acesso à Internet com taxa de pelo menos 100 Mbps.

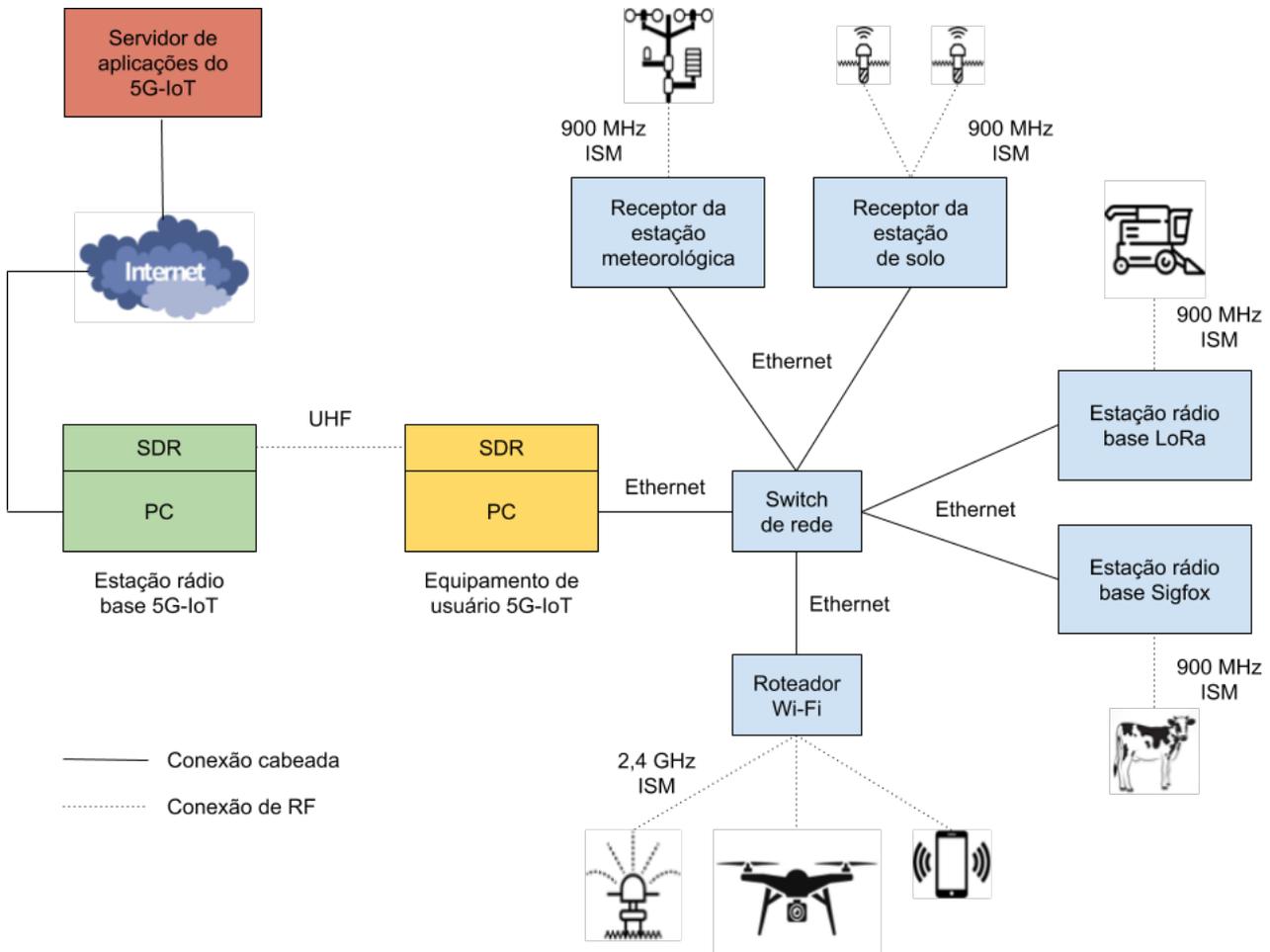


Figura 38: Rede 5G-IoT piloto: diagrama em blocos do sistema de aplicações IoT para o agronegócio.

A comunicação entre a estação rádio base e o equipamento do usuário é realizada por transmissão na faixa *Ultra High Frequency* (UHF), que tipicamente é reservada para a sinais de TV digital. No entanto, em 2021 a Anatel regulamentou o uso dos canais de TV ociosos para comunicação de dados através de uma rede secundária. Este espectro ocioso, denominado de *TV White Space* (TVWS), pode ser explorado para prover conectividade em áreas remotas e rurais, estendendo a flexibilidade das futuras redes móveis. Neste contexto, o 5G-IoT utiliza de técnicas de sensoriamento espectral para averiguar a disponibilidade do espectro, possibilitando a alocação dos canais vagos para a rede secundária. Apesar deste recurso inovador, a alocação dinâmica e não contínua do espectro exige que o sinal transmitido tenha uma baixa emissão fora de banda. Em outras palavras, o sinal secundário não poderá interferir na transmissão dos usuários primários em canais adjacentes, respeitando um índice máximo de *Adjacent Channel Leakage Power Ratio* (ACLR), sendo -44.2 dBc um valor adotado como referência [36]. Para isso, foi necessário implementar uma forma de onda que apresentasse uma baixa emissão fora da faixa de interesse. Entre as formas de onda investigadas, o GFDM com janelamento temporal se destacou pela sua performance em termos da emissão fora de faixa, principalmente,

quando comparado ao OFDM utilizado nas redes 4G e 5G NR, conforme resultado de simulação apresentada na Figura 39. Assim, a adoção do GFDM garantiu ao 5G-IoT a capacidade de prover comunicação de dados sem causar interferência no usuário primário. A Figura 40 ilustra o esquema de alocação dinâmica de TVWS implementada no 5G-IoT. Neste, o sinal da rede 5G-IoT (usuário secundário) ocupa inicialmente uma faixa ociosa de 24 MHz. Em seguida, o transmissor de TV digital (usuário primário) é ligado de forma a ocupar parte do espectro. Assim que o receptor do 5G-IoT identifica a presença do sinal de TV no espectro, a estação rádio base interrompe a alocação do espectro para os usuários secundários na banda em questão.

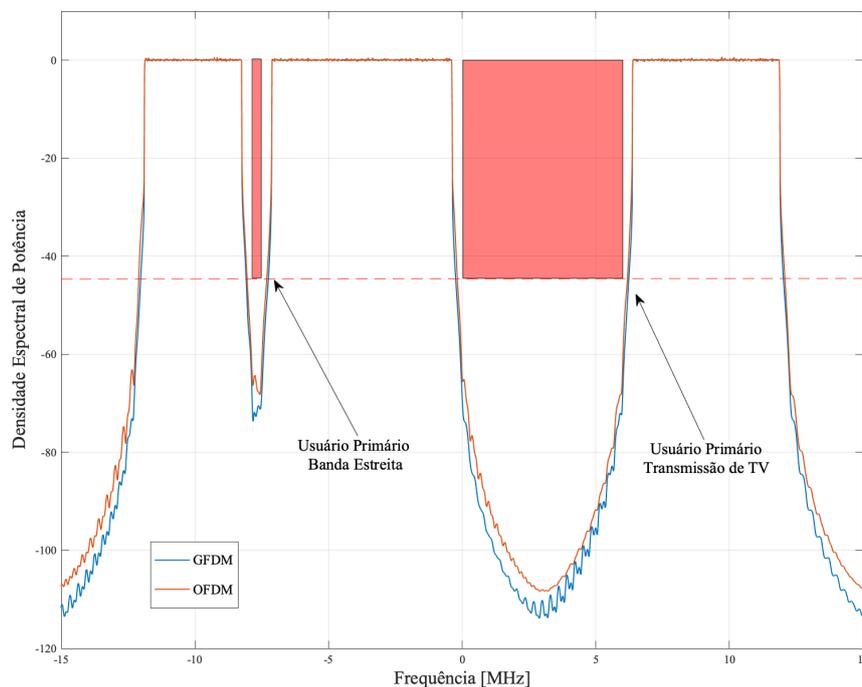


Figura 39: Emissão fora da faixa de interesse para as formas de onda GFDM e OFDM.

Uma rede 5G-IoT piloto foi montada nas dependências do Inatel, uma vez que esta demonstração coincidiu com restrições impostas pela pandemia da COVID-19. O cenário considerado para a demonstração prática da rede 5G-IoT é o mesmo apresentado na Figura 38. Foram utilizadas uma estação rádio base, operando como *backhaul* sem fio da rede 5G-IoT, e um terminal de usuário [30]. No equipamento do terminal de usuário, foram integrados os dispositivos que habilitam as diferentes aplicações de IoT. A Figura 41 mostra uma visão dos equipamentos utilizados na demonstração prática da rede piloto.

Além desta demonstração, foi realizado um teste de campo prévio, para confirmar a cobertura da rede em um ambiente real, conforme descrição detalhada apresentada em [36]. Os testes de campo confirmaram que a solução concebida e desenvolvida conseguiu prover a taxa de 100 Mbps a uma distância de 50 km.

A implementação prática da solução proposta pelo 5G-IoT se deu, principalmente, por meio de um sistema baseado em SDR. As principais etapas de Processamento Digital de Sinais (PDS) desenvolvidas e contempladas pelo transceptor em questão encontram-se resumidas no diagrama da Figura 42 e detalhadas em [33].

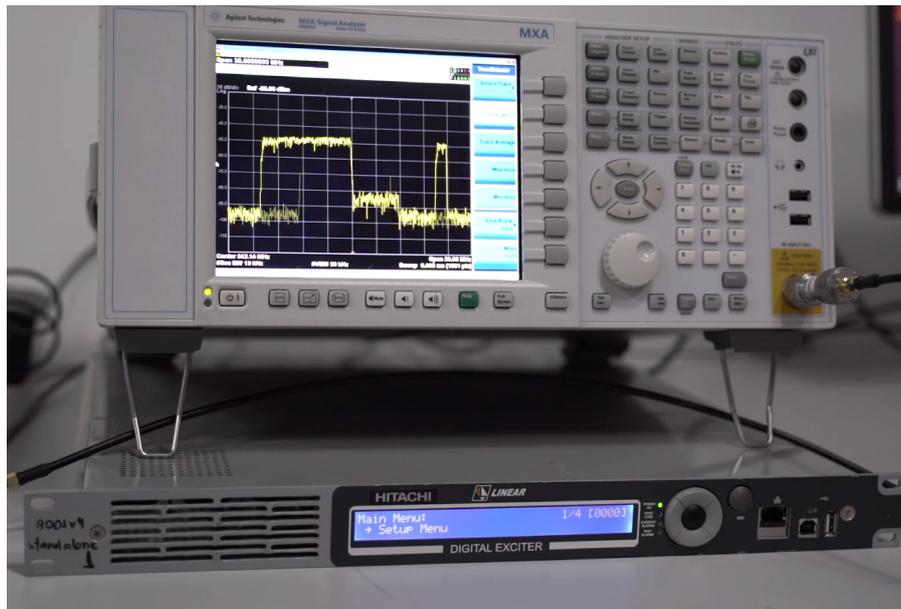


Figura 40: Demonstração da alocação dinâmica de TVWS.



Figura 41: Estação rádio base e terminal de usuário empregados na demonstração da rede 5G-IoT.

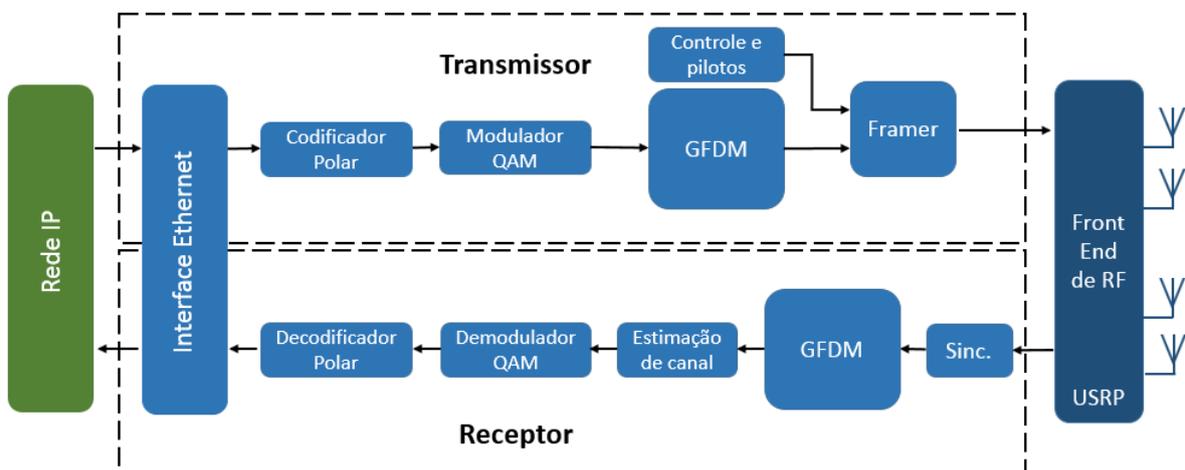


Figura 42: Diagrama de blocos das camadas principais do transceptor ponto a ponto.

Em sua especificação, o sinal banda base deve utilizar uma largura máxima de 24 MHz. Considerando que a frequência de amostragem é de 30,72 Mbps, o desenvolvimento é bastante desafiador quando se faz uso de *General Purpose Processors* (GPPs). A utilização de estratégias de aceleração e paralelismo para o processamento de sinais de banda base acaba por ser mandatória para se atingir a performance especificada. As características de software e hardware consideradas para a implementação da solução de referência do transceptor 5G-IoT estão apresentadas na Tabela 2 [33].

Tabela 2: Características de software e hardware do transceptor 5G-IoT.

Elementos de Hardware / Software	Características
Processador	Intel Core i9-9900 (8 cores) 16 GB de RAM
Plataforma SDR	National Instruments USRP 2954R
Potência dos amplificadores	Max. 12 W por antena
Ganho das antenas (dipolo meia-onda)	9 db
Plataforma de software	GNU Radio 3.7
Frequência de amostragem	30,72 MHz
Técnicas de aceleração e bibliotecas	SIMD, AVX-2 VOLK, FFTW, AFF3CT

A solução do transceptor desenvolvida para compôr a rede 5G-IoT foi utilizada como base para a implementação de uma solução com suporte a múltiplos usuários. Este suporte se dá por meio do compartilhamento dos recursos de transmissão entre os usuários e da expansão da camada MAC na gestão da rede. Uma versão inicial do transceptor multiusuário teve seu desenvolvimento iniciado após a finalização do projeto 5G-IoT. Neste, utilizou-se os principais blocos de processamento desenvolvidos no projeto 5G-IoT, porém, com adequações para obter uma maior flexibilização da alocação e compartilhamento de recursos de transmissão. Durante o projeto Brasil 6G, a versão inicial do transceptor multiusuário passou por algumas otimizações apresentadas nas seções a seguir.

3.2 Otimizações do Transceptor Multiusuário

Os pesquisadores envolvidos no projeto Brasil 6G propuseram otimizações para a versão inicial do transceptor multiusuário. As etapas de PDS deste transceptor foram implementadas em software utilizando as linguagens C/C++ e Python 2. A ferramenta GNU Radio foi adotada para implementação e teste da solução. A Figura 43 ilustra o diagrama de blocos generalizado do transceptor multiusuário. A camada MAC, responsável pela interface da rede Ethernet com o transceptor, viabiliza a transmissão e recepção de dados do usuário, a configuração, controle e gerenciamento da camada PHY. A camada *Inter-Process Communication* (IPC) é encarregada pela intercomunicação e troca de informações de controle e dados de usuário entre as camadas MAC e PHY. A camada PHY, por sua vez, é a responsável pela execução de processamentos relativos à transmissão e recepção de sinal via *Radio Frequency* (RF). Na transmissão, a camada PHY integra as etapas de codificação de canal, modulação digital, formatação de quadro de transmissão e codificação MIMO. Com relação à recepção de sinal, a camada PHY agrega as etapas de sincronização, estimação e equalização de canal, decodificação MIMO, demodulação digital e decodificação de canal. Maiores detalhes sobre as etapas da camada PHY encontram-se apresentados em [37]. A conversão de sinais de RF para o domínio digital e vice-versa é realizada

pela camada *front-end* de RF. O *front-end* de RF é composto por conversores analógico-digital e de frequência e interfaces para múltiplas antenas. O *front-end* de RF é controlado, por sua vez, pela camada PHY.

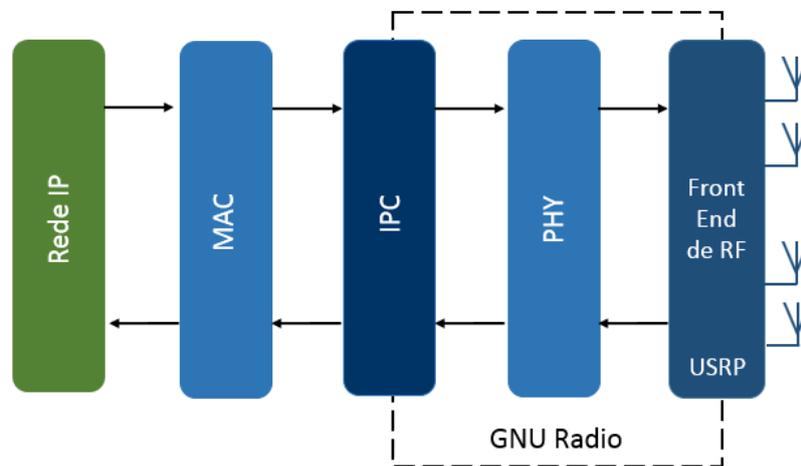


Figura 43: Diagrama de blocos das camadas principais do transceptor multiusuário.

A implementação de um sistema robusto de alta vazão com suporte a múltiplos usuários e com camada inteligente de controle é relativamente complexo e demanda a implementação de diversas rotinas de código, bem como a realização de diversos testes e otimizações. Embora a versão inicial do transceptor já implementada em projeto anterior tenha se mostrado funcional, alguns pontos poderiam passar por melhorias e otimizações. Durante o projeto Brasil 6G, algumas das otimizações mapeadas foram implementadas e estão descritas nas seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3. A seção 3.2.4, por sua vez, apresenta alguns resultados de testes e medidas práticas realizados após a implementação das referidas otimizações.

3.2.1 Otimizações da Camada MAC

A camada MAC é formada por diversas rotinas de processamento responsáveis pela definição de parâmetros de operação e alocação de recursos de transmissão da camada PHY, bem como a multiplexação e demultiplexação de pacotes de dados da rede Ethernet. Visando otimizar o tempo de processamento para execução das tarefas da camada MAC, a implementação explora o conceito de *threads*, que permite efetuar rotinas ou tarefas de forma paralela. A camada MAC foi concebida de forma a operar simultaneamente com 4 *threads*, responsáveis por realizar:

- Intercomunicação com a camada de aplicação, para tratamento dos dados do usuário;
- Intercomunicação com a camada PHY;
- Geração de base de tempo para transferência de dados para a camada PHY, baseada na duração temporal do quadro e sub-quadros de transmissão;
- E gerenciamento de *timeout* de pacotes IP.

Neste cenário, os pesquisadores realizaram testes de avaliação da versão inicial implementada da camada MAC em operações isoladas. Para tal, foi considerado um *set-up* com a comunicação entre duas camadas MAC por meio da rede Ethernet, sem fazer uso da camada

PHY como intermediária. Estes testes de avaliação levaram em consideração a taxa de comunicação estabelecida entre as camadas MAC. Para esta análise, foi estabelecido o uso de alocação máxima de recursos, 24MHz de banda, e parâmetros de operação da camada PHY que permite ao sistema ter a maior cobertura (numerologia 0), modulação 64 QAM e taxa de codificação 11/12 (MCS 22). Nesta configuração, o sistema proporcionaria, teoricamente, uma taxa de comunicação bruta de 115,7 Mbps. Para a configuração em questão, a camada MAC alcançou taxas de comunicação útil de até 26,7 Mbps, cerca de 3,8 vezes inferior à taxa útil esperada, e latência média da ordem de 6,5 ms. O mesmo teste mencionado foi realizado considerando o compartilhamento de recursos computacionais com algum outro processo que requer alta prioridade de execução, como aqueles associados ao GNU Radio. Neste teste em questão, pôde-se observar que houve uma significativa perda de desempenho em termos de taxa de dados proporcionadas pela camada MAC. A redução mensurada foi da ordem de 1,7 vezes em relação ao resultado obtido no primeiro teste, ou seja, sem operação do GNU Radio de forma simultânea. Não foi observada alteração significativa da latência com relação ao primeiro teste.

Para melhorar o desempenho da MAC e viabilizar o compartilhamento de recursos e a execução da PHY em um mesmo sistema computacional, os pesquisadores investigaram a priorização de *threads* e a otimização do processo de compilação de códigos em ambientes Linux. Com esta investigação, foi possível alterar as políticas de agendamento e execução de *threads* e definir os níveis de priorização adequados. Em termos da compilação, a diretiva “o3” foi adicionada para aumentar a velocidade de execução do programa. Após diversos testes e ajustes, foi possível definir uma configuração na qual o desempenho de execução da camada MAC se mantém praticamente inalterado em cenários de compartilhamento de recursos computacionais com o GNU Radio.

Além das otimizações mencionadas, também foram realizadas correções de *bugs* na MAC. Dentre estas correções, destacam-se os ajustes realizados no protocolo de transferência de parâmetros de operação da camada MAC para a camada PHY. Neste processo, foi identificado que a versão inicial da camada MAC limitava a definição da configuração da ordem de modulação empregada pela camada PHY em relação ao enlace de *uplink*, permitindo apenas o emprego de mapeamento QPSK ou 16 QAM, o que impacta diretamente na taxa de *upload* do sistema. A partir da identificação deste problema, foram realizadas correções no protocolo mencionado, de forma a viabilizar o emprego de ordem de modulações maiores no enlace de *uplink*, tal como 64 e 256 QAM. Além disso, foram reduzidas ao máximo a geração de mensagens e alertas de depuração do funcionamento do sistema.

A Figura 44 mostra uma das medidas de vazão de dados realizadas durante as análises das otimizações da camada MAC. Nesta, a tela do terminal Linux, no canto inferior direito, indica o resultado da medida de vazão de dados. A taxa útil média alcançada foi de 97,1 Mbps, com picos de até 99 Mbps. A taxa foi identificada por meio da ferramenta de análise de rede *iperf*. Nestas análises, o GNU Radio está sendo executado de maneira simultânea ao MAC, conforme indicado na Figura 44.

A Tabela 3 indica os resultados de testes de vazão de dados para o *downlink* e o *uplink* utilizando as versões original e otimizada da camada MAC. Para a taxa de dados do *uplink*, foram considerados dois cenários distintos: (i) a alocação de todos os recursos de transmissão do sistema para um único usuário com 24 MHz de banda; e a alocação de 1/4 (6 MHz) dos recursos disponíveis. Para o enlace de *downlink* foi considerada a alocação de todos os recursos de transmissão, ou seja, 24 MHz de banda. Os demais parâmetros de operação do sistema são os mesmos citados no teste da camada MAC isolada. A designação “Sem GNU” indica a

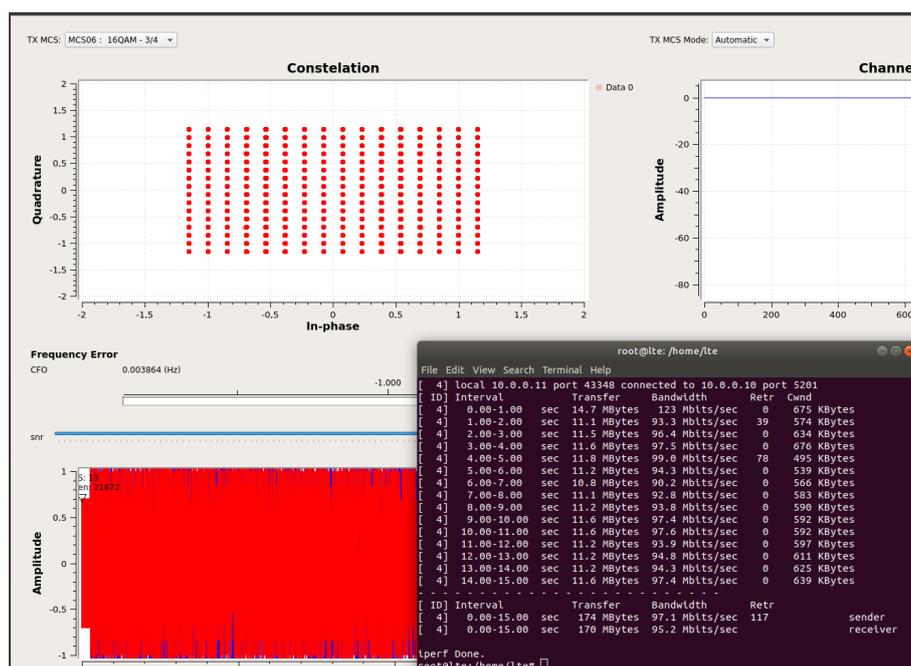


Figura 44: Taxa de comunicação do MAC com execução simultânea do GNU Radio.

operação exclusiva da camada MAC no sistema computacional, enquanto “Com GNU” indica a execução da camada MAC de maneira simultânea com o GNU Radio. Vale ressaltar que o projeto executado no GNU Radio não considerava a integração com um *front-end* externo. A partir dos resultados apresentados na Tabela 3, pôde-se evidenciar o aumento do desempenho da camada MAC, proporcionando maior vazão de dados, bem como melhora na capacidade de operação quando há necessidade de compartilhamento dos recursos computacionais com o GNU Radio. As melhorias no desempenho foram obtidas a partir da implementação das otimizações supracitadas.

Tabela 3: Camada MAC: taxa útil de comunicação.

Versão do Transceptor multiusuário	Enlace	Alocação 24 MHz	Alocação 6 MHz
		Taxa Mbps	
Original Sem GNU	<i>Downlink</i>	15,9	-
	<i>Uplink</i>	26,7	5,93
Original Com GNU	<i>Downlink</i>	5,25	-
	<i>Uplink</i>	9,16	5,47
Otimizada Sem GNU	<i>Downlink</i>	98,4	-
	<i>Uplink</i>	98,6	24,2
Otimizada Com GNU	<i>Downlink</i>	98,3	-
	<i>Uplink</i>	98,5	24,3

3.2.2 Otimizações da Camada IPC

A interface entre as camadas MAC e PHY foi realizada pela camada IPC. O uso desta interface é facilitada pela grande quantidade de IPCs já implementados no kernel Linux, não requerendo bibliotecas adicionais. Entre os IPCs disponíveis, o protocolo *Portable Operating System Interface* (POSIX) foi adotado por melhor se adequar às características de fluxo de dados entre as camadas no transceptor. Este protocolo é baseado em um conjunto de normas definido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para estabelecer compatibilidade entre sistemas operacionais. No POSIX, os processos trocam grandes quantidades de dados por meio do kernel. Neste caso, por exemplo, a comunicação é baseada no envio de uma mensagem ao kernel pelo processo A, e o recebimento e execução desta mesma mensagem é realizada pelo processo B, conforme ilustrado na Figura 45.

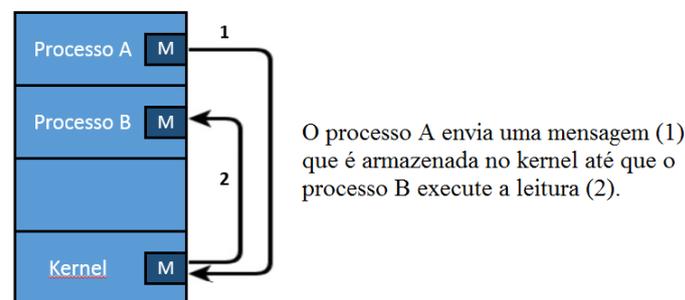


Figura 45: Diagrama de comunicação IPC POSIX.

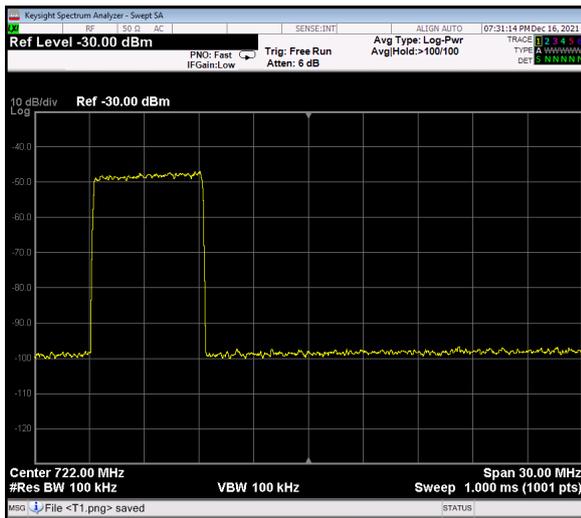
Visando reduzir o tempo de implementação, a versão inicial da camada IPC foi desenvolvida na linguagem de programação Python. Um dos problemas detectados nesta abordagem é a impossibilidade de parametrizar a priorização das *threads* envolvidas no processo. Para um melhor desempenho de todo o sistema, é necessário que todos os processos possam garantir a execução de forma compatível com o fluxo de dados envolvidos. Assim como ocorrido na camada MAC, foi adotada a abordagem de priorização da execução das tarefas associadas à camada IPC. Desta forma, para tornar este procedimento viável, foi necessário reescrever os códigos da camada IPC em C++, justamente por esta linguagem permitir o controle de priorização. Adicionalmente, esta migração também melhora significativamente o desempenho das funções envolvidas.

3.2.3 Otimizações da Camada PHY

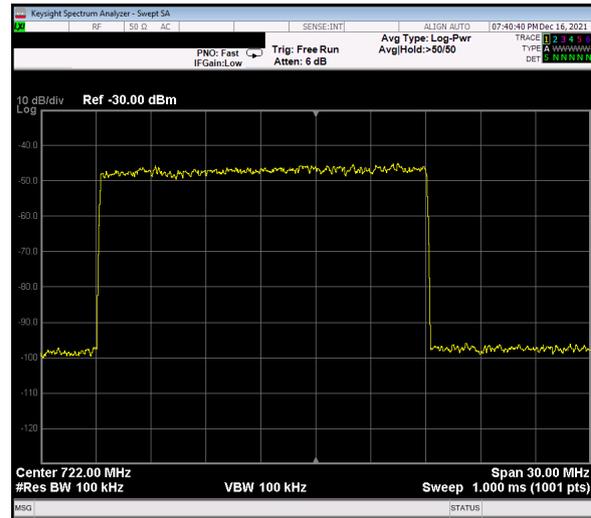
A camada MAC do terminal de usuário exige a alocação de recursos de transmissão para a sua camada PHY, baseado na quantidade de dados a serem transmitidos. Esta alocação de recursos é realizada de maneira dinâmica a nível do subquadro de transmissão e respeita um limite máximo de recursos reservados para tal terminal. A limitação é definida pela camada MAC da estação rádio base e é transmitida como uma informação de controle para os terminais de usuário. Durante a integração entre as camadas MAC e PHY, foi identificada que a alocação de recursos de transmissão de um dado terminal de usuário eventualmente não se limitava à quantidade de recursos máximos reservados para o mesmo. A informação de configuração dos recursos máximos reservados para o *uplink* do terminal de usuário não era devidamente interpretado pela camada PHY, o que resultava em sobreposição espectral de informações transmitidas por diferentes terminais e interferência na estação rádio base. A partir da realização

das devidas correções, foi possível realizar a correta limitação dos recursos empregados pelo terminal do usuário.

A Figura 46 ilustra o espectro do *uplink* gerado pelo terminal do usuário para diferentes configurações de alocação máxima de recursos. Os espectros foram obtidos durante a execução da ferramenta de análise de redes *iperf*, configurada para gerar tráfego de dados no sentido do *uplink*.



(a) Terminal com limitação de 6 MHz.



(b) Terminal com limitação de 18 MHz.

Figura 46: Espectro de *uplink* para diferentes configurações de limite máximo de alocação de recursos.

Além disso, foram realizadas otimizações referentes à redução dos tamanhos dos *buffers* empregados na interface entre as subetapas que compõem a camada PHY. Esta otimização teve por objetivo reduzir a latência de processamento da camada PHY e a quantidade de recursos computacionais demandada pelo sistema.

O processo de controle de leitura de dados da camada IPC também passou por otimizações. Estas tiveram por objetivo evitar o acúmulo (*overflow*) ou falta (*underflow*) de dados na saída do transceptor, reduzir a inserção de informações de enchimento em caso de ocorrência de falta de dados de transmissão e, conseqüentemente, reduzir a latência na comunicação. A otimização em questão envolveu a geração de uma sinalização de controle pela etapa de multiplexação de quadro, que é responsável por gerar os dados a serem transmitidos ao *front-end* de RF, fazendo uso do bloco de interface do *Universal Software Radio Peripheral Hardware Driver* (UHD) do GNU Radio. Sempre que um subquadro de informação é repassado à interface UHD, uma nova sinalização de controle é gerada. Esta sinalização é recebida pela etapa de processamento de dados, sendo responsável pela requisição de dados da camada IPC. A etapa em questão realiza um controle da quantidade de informação repassada ao multiplexador de quadros para a interface UHD.

A partir da recepção da sinalização de fluxo mencionada, é realizado o controle de requisição de dados da camada IPC ou da geração de dados de enchimento. A geração de dados de enchimento é realizada apenas caso seja identificado que o *buffer* de saída do multiplexador de quadros esteja próximo de seu limite mínimo, ou seja, próximo da ocorrência de *underflow*. A Figura 47 destaca nos pontos 1 e 2, respectivamente, os blocos de geração e recepção da

sinalização empregada para o controle de fluxo da transmissão de dados, implementados após a otimização.

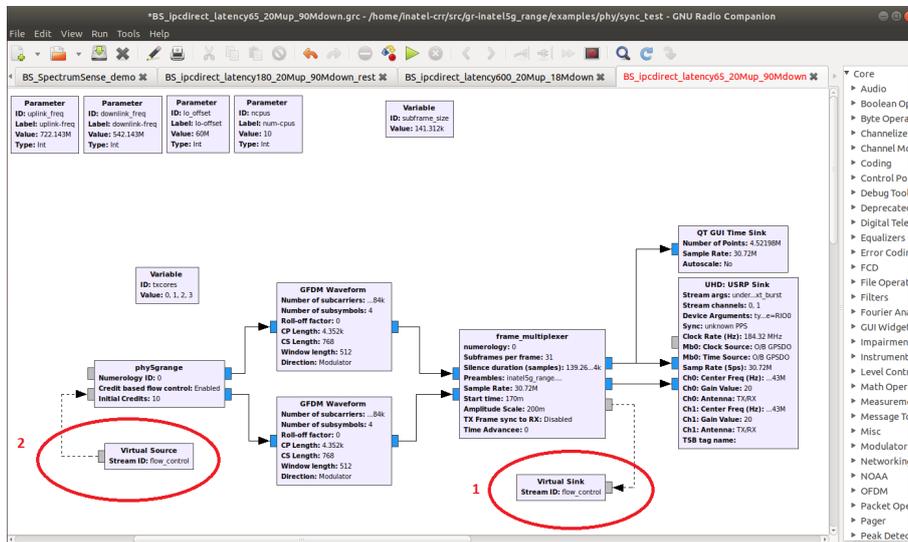


Figura 47: Inserção de informação de controle de fluxo na camada PHY.

3.2.4 Resultados de Medidas e Testes Práticos

A Figura 48 mostra uma visão do *set-up* empregado para a realização de testes do transceptor multiusuário otimizado. No *set-up* em questão foram empregados os seguintes equipamentos: 3 computadores de uso geral, sendo dois deles com processadores Xeon (10 cores) e um deles com processador i9 (8 cores), e 16GB de RAM; 3 *front-ends* de RF compostos por *Universal Software Radio Peripherals* (USRPs), sendo dois destes do modelo NI USRP-2952 e um NI USRP-2954N; 1 analisador de sinais modelo MXA N9020A. Apenas a estação rádio base foi conectada à rede local cabeada com acesso à Internet. Os terminais de usuário estabeleceram comunicação com a estação rádio base exclusivamente a partir do enlace de RF. Os IPs adotados na realização dos testes foram: 10.0.0.10 para a estação rádio base, 10.0.0.11 para o terminal de usuário 1 e 10.0.0.12 para o terminal de usuário 2.

Tabela 4: Resultados de medidas práticas antes e após as otimizações (6 MHz).

Versão do transceptor	Enlace	Taxa Mbps	Latência ms
Original	<i>Downlink</i>	2	650
	<i>Uplink</i>	2	650
Otimizada	<i>Downlink</i>	94,8	65
	<i>Uplink</i>	20,9	65

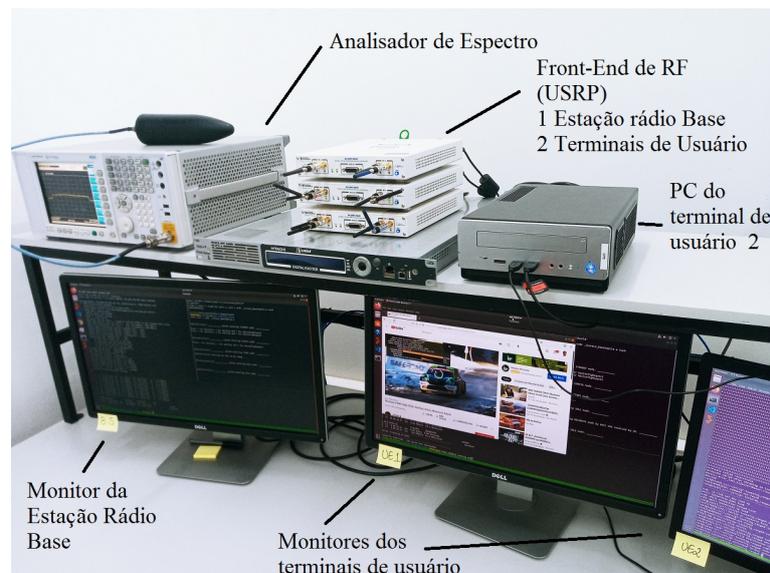


Figura 48: *Set-up* de testes.

A versão original do transceptor multiusuário apresentava latência de comunicação na ordem de 650 ms e vazão de dados na ordem de 2 Mbps. A partir das otimizações e correções citadas nas seções anteriores, pode-se alcançar melhoras significativas em relação à taxa e latência. A Tabela 4 apresenta um comparativo entre taxas de comunicação e latência das versões original e otimizada do transceptor multiusuário. Vale ressaltar que estes resultados consideram um terminal de usuário conectado à estação rádio base e alocação máxima de recursos para o terminal de usuário equivalente a 1/4 do total, ou seja, a ocupação máxima de 6 MHz de banda para o enlace de *uplink*. Para o enlace de *downlink*, foi considerado o uso de todos os recursos, ou seja, de 24 MHz de banda. As medidas de taxa foram identificadas a partir da ferramenta de análise de redes *iperf*, enquanto a latência foi identificada a partir da ferramenta *ping*. As ferramentas utilizadas são nativas do sistema operacional Linux e são amplamente utilizadas na avaliação de desempenho de redes IP.

A seguir, estão apresentados os resultados de algumas medidas obtidas ao longo do levantamento dos dados apresentados na Tabela 4. A Figura 49 mostra o resultado da medida de taxa no sentido do *downlink*, enquanto a Figura 50 mostra o resultado da medida de taxa no sentido do *uplink*. A Figura 51, por sua vez, ilustra a medida da latência da comunicação entre a estação rádio base e o terminal de usuário. Os comandos empregados para a identificação de cada uma das medidas encontram-se apresentados na última linha do terminal em cada uma das figuras citadas.

Também foram realizados alguns testes práticos para verificar o QoS da Internet fornecido ao terminal do usuário. Conforme mencionado anteriormente, a estação rádio base opera no *set-up* de testes como um *backhaul*, provendo o acesso à Internet para os terminais de usuários. A Figura 52 mostra uma medida de velocidade de acesso à Internet obtida a partir do terminal de usuário 1. Neste caso, a taxa e a latência obtidas diferem da Tabela 4 devido ao compartilhamento de recursos de processamento do computador com o navegador e, também, pelo acesso à servidores remotos da Internet.

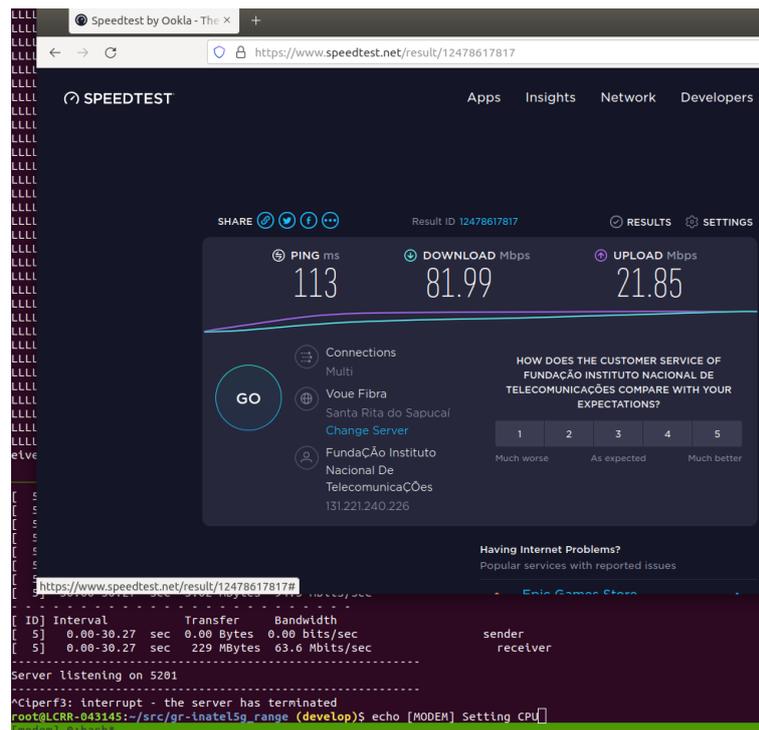


Figura 52: Velocidade de acesso à Internet a partir do terminal do usuário.

A Figura 53 ilustra o acesso do terminal de usuário a um serviço de *streaming* de vídeo. O teste em questão permite evidenciar a compatibilidade e interoperabilidade das camadas de processamento implementadas com o uso cotidiano da Internet.

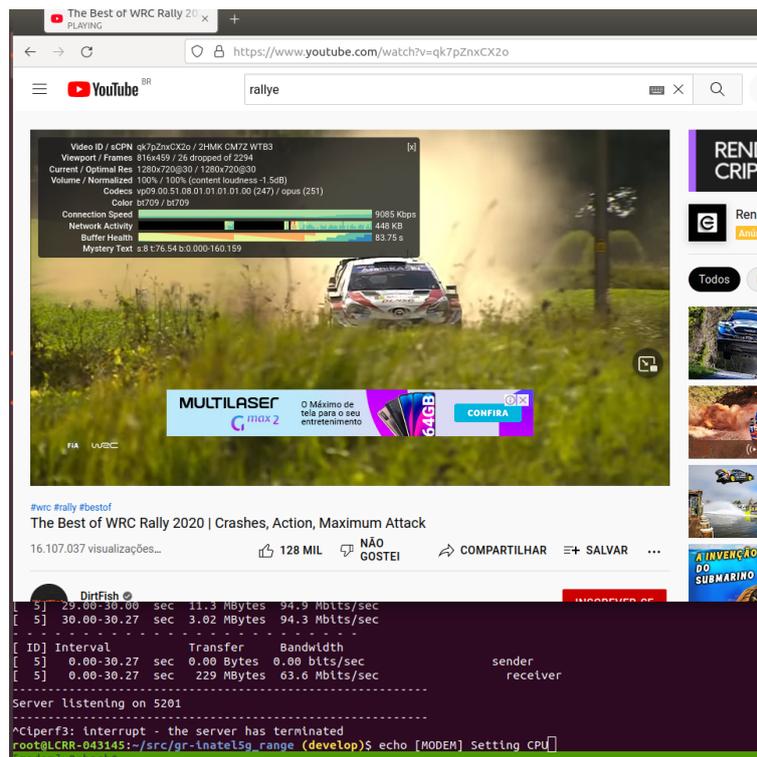


Figura 53: Acesso a um *streaming* de vídeo a partir do terminal do usuário.

Na Figura 54, considerou-se um cenário de teste prático no qual o espectro de *uplink* é compartilhado entre dois terminais de usuários. Cada terminal foi configurado para utilizar no máximo 1/4 do total de recursos de transmissão, o que equivale a 6 MHz. O posicionamento espectral dos recursos reservados para cada usuário foi configurado com um espaçamento de 6 MHz de forma a evidenciar a alocação espectral de cada terminal e a ausência de sinal nas faixas reservadas.

A Figura 55, ilustra a comunicação da estação rádio base com os dois terminais de usuários. Pode-se observar que a latência obtida na comunicação com o terminal de usuário 2, que faz uso do IP 10.0.0.12, é maior do que aquela obtida na comunicação com o terminal de usuário 1. Neste caso, o processador do terminal 2 apresenta uma quantidade menor de núcleos em relação ao usuário 1, o que impacta no aumento da latência. Apesar disso, a comunicação entre estação radio base e os dois terminais foi estabelecida com sucesso.

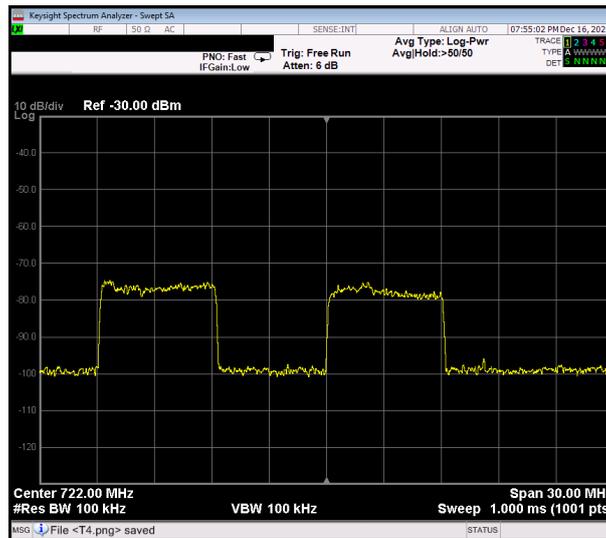


Figura 54: Compartilhamento de espectro de *uplink* entre dois terminais de usuário.

```

5G Range PHY RX Block - numerology 0
5G Range PHY RX Block - numerology 0
MAC interface thread priority: 69
5G Range PHY TX Block - numerology 0
set_min_output_buffer on block 7 to 72704
set_min_output_buffer on block 8 to 1048576
set_min_output_buffer on block 9 to 1048576
set_min_output_buffer on block 10 to 1130496
set_min_output_buffer on block 11 to 1130496
frame_sync : Current timestamp is : 0,150000
Received PHYConfig.Request Message.

root@LCRR-043144:~/src/gr-inatel5g_range (develop)$ ping 10.0.0.11
PING 10.0.0.11 (10.0.0.11) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 10.0.0.11: icmp_seq=1 ttl=64 time=64.6 ms
64 bytes from 10.0.0.11: icmp_seq=2 ttl=64 time=70.4 ms
^C
--- 10.0.0.11 ping statistics ---
2 packets transmitted, 2 received, 0% packet loss, time 1000ms
rtt min/avg/max/mdev = 64.668/67.539/70.410/2.871 ms
root@LCRR-043144:~/src/gr-inatel5g_range (develop)$ ping 10.0.0.12
PING 10.0.0.12 (10.0.0.12) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 10.0.0.12: icmp_seq=1 ttl=64 time=208 ms
64 bytes from 10.0.0.12: icmp_seq=2 ttl=64 time=214 ms
^C
--- 10.0.0.12 ping statistics ---
2 packets transmitted, 2 received, 0% packet loss, time 1001ms
rtt min/avg/max/mdev = 208.314/211.637/214.961/3.355 ms
root@LCRR-043144:~/src/gr-inatel5g_range (develop)$ [
[modem] 0:ping*
    
```

Figura 55: Comunicação da estação rádio base com dois terminais de usuário.

3.3 Desenvolvimentos Relativos à Inteligência Artificial

Para dar início à implementação de algoritmos de IA no transceptor, os pesquisadores do projeto Brasil 6G escolheram inicialmente aplicações que apresentassem uma menor complexidade, mas que, ao mesmo tempo, apontassem para o provimento de soluções necessárias para as futuras redes móveis. Assim, uma abordagem inicial aponta para uma evolução na adequação de parâmetros da camada física para o melhor atendimento dos serviços em relação às características dos casos de uso e do QoS contratado. Mais especificamente, um dos possíveis aperfeiçoamentos reside na adaptação da vazão e da confiabilidade do enlace. Assim, dentro destas premissas, os pesquisadores investigaram a aplicação de IA na definição do índice de amplitude de correção. A evolução desta investigação está descrita a seguir.

3.3.1 Aplicação do Índice de Amplitude de Correção

O estabelecimento de indicadores, que apontam com precisão os limites de confiabilidade de um determinado enlace, dependerá da detecção do ponto de ocorrência de erros. Muitos algoritmos, no entanto, vinculam paradoxalmente a detecção de erros à determinação destes limites para definir níveis mais altos de confiabilidade. Um dos principais indicadores a serem tratados é o índice MCS. Para a definição deste índice, são atualmente utilizados métodos e indicadores que dependem da suposta idealidade dos processos. Por exemplo, algoritmos que utilizam as subportadoras piloto, CP e preâmbulos não levam em conta as imprecisões de estimativa de canal nas subportadoras. Porém, estas imprecisões podem ser significativas, dependendo do tipo de canal e do mapeamento de canais piloto. Além disso, os limites tendem a ser baseados em tabelas com margens de segurança e histerese fixos.

Uma avaliação mais precisa do estado do sistema, dada determinada condição de enlace, pode ser obtida a partir de uma análise criteriosa do que está acontecendo internamente na camada PHY. Para que sejam levadas em conta as possíveis imperfeições do sistema, ou não conformidades de condições previamente estabelecidas, é necessário monitorar o que os algoritmos determinísticos de recepção apontam como provável limiar de erros. Assim, uma abordagem inicial tende a focar os decodificadores. Por exemplo, é possível externalizar dados estatísticos para a geração de um grau ou probabilidade de ocorrência de erros em função do estado dos algoritmos de decodificação. Uma proposta é a medida do grau de correção aplicada às técnicas de correção de erros, sejam estas realizadas de forma direta ou indireta. Este indicador pode ser entendido como uma função que dimensiona a distância de um determinado sistema de decodificação a uma ocorrência de erros. Ou ainda, é o grau de correção que o sistema de decodificação está aplicando antes da ocorrência de erros, quando comparado à decodificação sem as técnicas de detecção de erros ou de análise probabilística. No código Reed-Solomon, esta informação é facilmente obtida, pois o algoritmo fornece o número de bits corrigidos. Já no *Low Density Check Parity Code* (LDPC) e *Polar Code*, é necessário um pré-processamento para a geração da magnitude deste valor.

Levando em conta somente a medida de SNR para a determinação do índice de MCS, os limites de transição entre diferentes esquemas pode ser obtido empiricamente, de acordo com o comportamento e eficiência de cada receptor. Para esta análise, aplicando um valor fixo de MCS e explorando a taxa de erros com a variação de SNR, é possível detectar estes pontos de início de ocorrência de erros, ou de uma taxa de erros, em função da magnitude do ruído, como ilustrado na Figura 56. De posse destes valores, margens de segurança e histerese podem ser aplicadas de acordo com o grau de confiabilidade ou de taxa de dados necessária, ou seja, de acordo com os índices de QoS que regem determinado serviço. Percebe-se que, sem a informação na região imediatamente anterior à ocorrência de erros, é difícil dimensionar o grau de confiabilidade em que se encontra o enlace. Neste caso, será possível detectar os erros que ocorreriam a partir da criação de um região de monitoração, como indicado na Figura 56.

Uma das técnicas promissoras para a correção de erros em sistemas de comunicação da próxima geração é o *Polar Code*. Esta técnica está implementada no transceptor em estudo. Assim sendo, um modelo de geração do índice de amplitude de correção, ou *Error Correction Amplitude* (ECA), foi proposto baseado nesta técnica e utilizando o esquema apresentado na Figura 57. Nesta, após o sistema ter realizado a estimação de canal e equalização dos símbolos, a função de *demapper* determina os símbolos de referência para a decodificação, formando a base para o cálculo do vetor de *Logarithmic Likelihood Ratio* (LLR), utilizado pelo decodificador Polar. Pelo outro caminho, a definição de símbolos decididos realiza a decodificação de bits

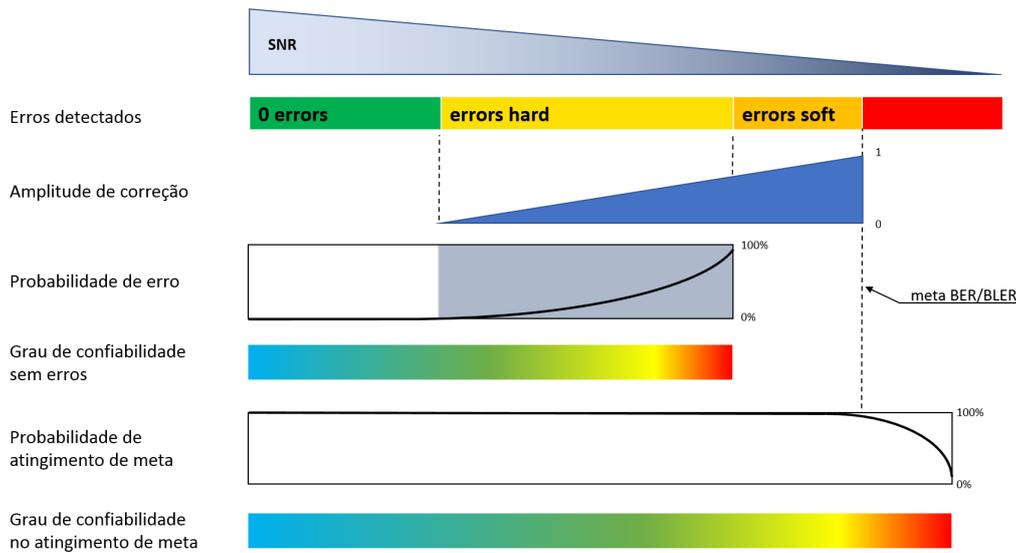


Figura 56: Monitoração de região prévia à ocorrência de erros.

sem o cálculo probabilístico. O bloco de cálculo do índice de correção de erros compara os bits gerados por um e outro caminho e formata o grau de amplitude de acordo com o valor de diferença entre os bits. Também é possível conformar este índice em função da BER.

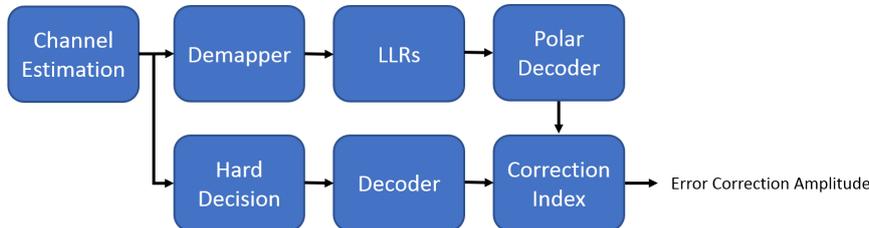


Figura 57: Modelo com uso de *Polar Code* implementado no transceptor.

O módulo *Polar Code* utilizado para esta prova de conceito é o AFF3CT, que consiste em um *software* de código aberto escrito em C++ e abrange uma grande variedade de códigos *Forward Error Correction* (FEC). O número de esquemas de MCS utilizados foi um total de 22, distribuídos em 4 modulações (QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM) e 9 taxas de código, sendo escolhidas para fins de demonstração e simulações, não apresentando compatibilidade com os esquemas utilizados nas normas de *Long Term Evolution* (LTE) ou 5G. O comprimento de código é de 2048 bits. A Tabela 5 apresenta com detalhes esta distribuição.

A implementação dos algoritmos propostos para o cálculo do índice de correção de erros do *Polar Code* mostrou-se válida e coerente. A conformação deste índice de forma a vincular valores de referência para todos os MCS a uma taxa de erros pode ser executada de forma ainda mais precisa ou de acordo com a BLER. Outras técnicas de FEC e de decodificadores podem também ser empregadas dentro da mesma abordagem e criando este mesmo vínculo. Desta forma, este indicador pode gerar uma informação independente e direta para o sistema. Porém, a importância desta conformação para uso em uma futura rede neural, como será proposto mais adiante, é no sentido de criar uma menor variância nos vetores de entrada desta em função do valor de MCS.

Tabela 5: Definição de MCS.

MCS	Modulação	K (N=2048)	Efic. Espectral	SNR(lim. 10^{-6})
1	QPSK	1024	1,0000000	3,8 dB
2	QPSK	1192	1,1640625	4,6 dB
3	QPSK	1368	1,3359375	5,5 dB
4	QPSK	1536	1,5000000	6,2 dB
5	QPSK	1704	1,6640625	7,3 dB
6	QPSK	1792	1,7500000	7,8 dB
7	16-QAM	1024	2,0000000	10,3 dB
8	16-QAM	1192	2,3281250	11,3 dB
9	16-QAM	1368	2,6718750	12,2 dB
10	16-QAM	1536	3,0000000	13,2 dB
11	16-QAM	1704	3,3281250	14,3 dB
12	16-QAM	1792	3,5000000	14,9 dB
13	64-QAM	1280	3,7500000	16,1 dB
14	64-QAM	1368	4,0078125	16,8 dB
15	64-QAM	1480	4,3359375	17,9 dB
16	64-QAM	1600	4,6875000	18,9 dB
17	64-QAM	1704	4,9921875	19,7 dB
18	64-QAM	1792	5,2500000	20,4 dB
19	256-QAM	1368	5,3437500	24,4 dB
20	256-QAM	1536	6,0000000	25,3 dB
21	256-QAM	1704	6,6562500	26,4 dB
22	256-QAM	1792	7,0000000	27,1 dB

A aplicação do índice ECA possibilita o acréscimo de uma informação importante no sentido de mensurar o estado real do enlace, independentemente desta não conformidade. Porém, para uma avaliação ainda mais precisa, são necessários vários ensaios para que o mapeamento desta diferença determine empiricamente os valores limites de confiabilidade de acordo com canais diversos, valor atual de MCS e metas de QoS. Além disso, esta diferença vai depender diretamente dos tipos de técnicas e algoritmos utilizados pelos diversos tipos de transceptores. A aplicação da característica adaptativa e de aprendizado dos algoritmos de aprendizado de máquina pode ser bastante vantajosa para a determinação dos resultados pretendidos. Resta fazer a análise sobre as arquiteturas e topologias que são mais eficientes em um balanço de acurácia e custo de processamento.

3.3.2 Definição da Topologia, Parâmetros e Algoritmos de Aprendizado de Máquina

As ações que deverão ser efetuadas ou indicadas pelo algoritmo de aprendizado de máquina compreendem a permanência no atual índice de MCS ou uma indicação de saltos. Estes saltos podem ser positivos (*fall forward*) ou negativos (*fall back*), como também podem ter uma amplitude unitária ou não. Em outras palavras, o processo pode incrementar ou decrementar o índice um passo a cada frame de domínio do MCS ou, se for necessário, fazer um salto imediato ao valor que melhor satisfaça as condições requeridas. Três abordagens podem ser indicadas para determinar estas ações: decisão direta, índice para decisão indireta e tabela para decisão

indireta.

Decisão direta: Nesta abordagem, utiliza-se *Reinforcement Learning* (RL) ou algoritmos determinísticos. A saída do modelo indica a ação imediata a ser tomada, ou seja, o valor de MCS a ser utilizado, conforme indicado na Figura 58.

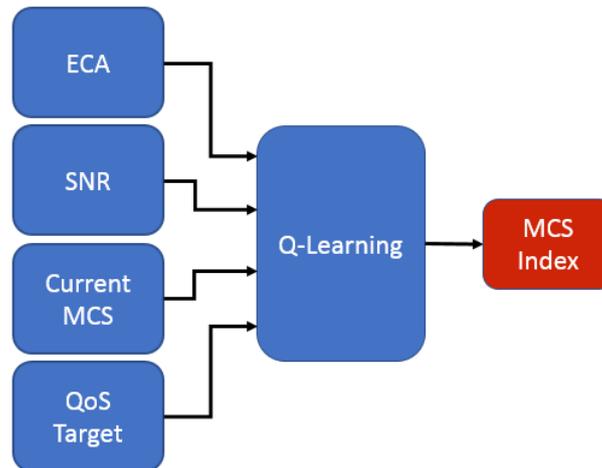


Figura 58: Decisão direta com aprendizado de reforço.

Índice para decisão indireta: Nesta abordagem, empregam-se técnicas de *Machine Learning* (ML), na qual o índice ECA é conformado para entregar a perspectiva de atingimento de metas para, por exemplo, a taxa de erro de bit no atual índice. Neste caso, a ação é tomada conforme o atingimento ou não das metas, como esboçado no diagrama da Figura 59.

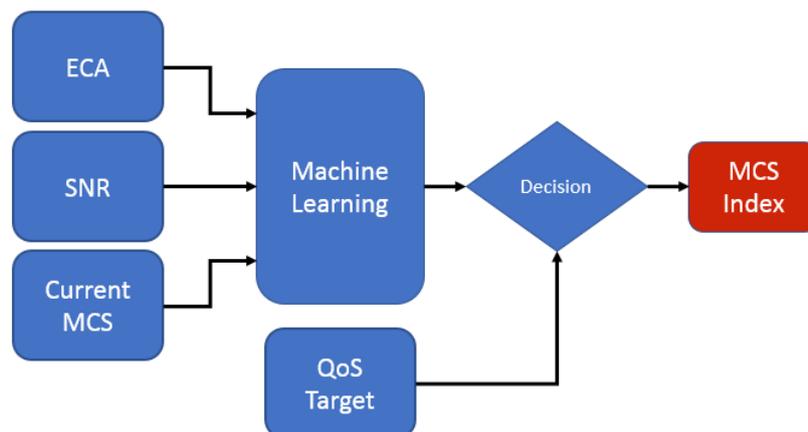


Figura 59: Decisão indireta com conformação de índice.

Tabela para decisão indireta: utilizando técnicas de ML de forma a entregar qual a probabilidade de atingimento das metas de cada índice ou de um grupo de índices. Neste caso, a ação é posteriormente tomada conforme este e outros indicadores do QoS do sistema, como indicado no diagrama da Figura 60.

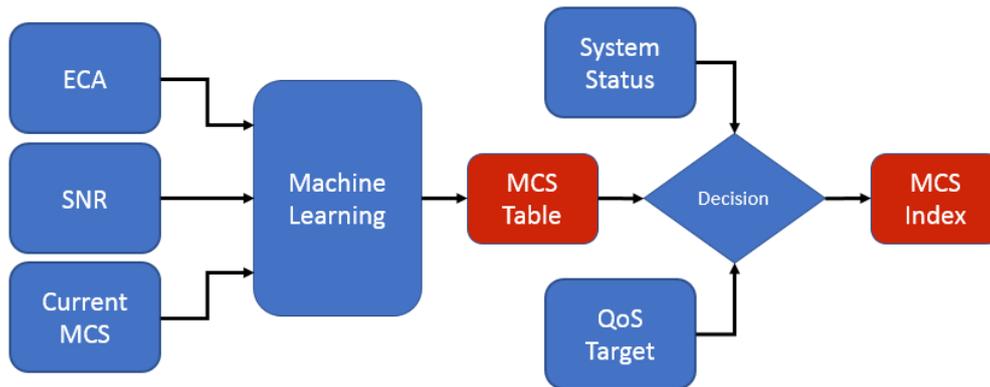


Figura 60: Decisão indireta com coeficientes de atingimento de meta.

3.3.3 Decisão Direta com RL

Entre os algoritmos baseado em RL, o *Q-learning* tem se destacado para sistemas com tomada de decisão. O *Q-Learning* consiste em criar um fluxograma de ações baseadas em recompensas, determinadas conforme a relevância de escolhas realizadas para atingir um estado final. Desta forma, o mapeamento de ações é processado a partir de uma matriz de valores denominada *Q-values*. Este método é bastante empregado pela sua baixa complexidade, não exigindo um sistema computacional robusto.

No contexto do transceptor, para executar este método, foram utilizados como parâmetros de entrada o estado atual de MCS, o valor de SNR e o valor de ECA. A inclusão de SNR foi necessária devido às características das curvas de desempenho das constelações 2^N com N assumindo os valores 2, 4, 6 e 8. Estas configurações foram definidas para as normas do LTE e do 5G. Neste caso, o arranjo gera lacunas de performance de até 4 dB entre os esquema de modulação. Quando o *Polar Code* é configurado para preencher estas lacunas em termos de desempenho com ruído, a eficiência espectral resultante torna injustificável a criação de um novo índice de MCS na região. Esquemas de modulação utilizando N com valores ímpares, ou ainda constelações multidimensionais, estabeleceriam um uso melhor destas lacunas e, conseqüentemente, uma melhor eficiência espectral de todo o sistema.

As ações a serem executadas são, como já citado, reunidas em um vetor com 3 comandos: *stay*, *up* e *down*. Este representam, respectivamente, uma permanência no atual MCS, um *fall forward* ou um *fall back*. Nesta implementação, a saída indica o índice de MCS mais adequado à condição apresentada. O estado de atingimento deste ponto, ou o mais próximo possível, se dá quando o algoritmo apresenta iterações consecutivas de permanência (*stay*). O número de iterações foi especificado como 20 no processo de treinamento e como 2 na inferência. Valores maiores podem ser utilizados, mas estes já se mostraram suficientes para uma boa convergência. O número de MCS utilizados é de 22, enquanto que o número de posições de SNR é de 280, considerando o intervalo de 0 a 28dB com passos de 0.1 dB. O valor máximo utilizado para o índice de ECA é 5.0, onde o valor unitário corresponde a uma taxa meta de BER igual a 10^{-6} . A matriz de recompensas leva em conta a eficiência espectral, que aumenta com o índice de MCS. Em relação à SNR, há uma diminuição gradativa de recompensas negativas até serem atingidos valores zeros na região que será regida pelo indicador ECA. A meta da taxa de erro de bit é 10^{-6} para quando o índice ECA atingir 1.0. Finalmente, o estado com um valor de pico de recompensa é fixado exatamente neste ponto, visando criar uma matriz de *Q-values* que gere uma inferência de ações de modo a convergir para este estado.

A Figura 61 mostra, como exemplo, parte da matriz de recompensas para o MCS 21. Para a simulação e execução do algoritmo de *Q-Learning*, foi utilizada a linguagem Python 3. O valor máximo de ECA foi estabelecido como 5.0 e a curva de MCSs decididos pelo algoritmo foi então obtida com o valor alvo de $ECA = 1,0$. A Figura 62 indica que os valores obtidos estão ajustados com a taxa alvo de $BER = 10^{-6}$.

-80.	-79.	-78.	-77.	-76.	-75.	-74.	-73.	-72.	-71.	-70.	-69.	-68.	-67.
-66.	-65.	-64.	-63.	-62.	-61.	-60.	-59.	-58.	-57.	-56.	-55.	-54.	-53.
-52.	-51.	-50.	-49.	-48.	-47.	-46.	-45.	-44.	-43.	-42.	-41.	-40.	-39.
-38.	-37.	-36.	-35.	-34.	-33.	-32.	-31.	-30.	-29.	-28.	-27.	-26.	-25.
-24.	-23.	-22.	-21.	0.	0.	0.	0.	284.	40.	40.	40.	40.	40.
40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.	40.

Figura 61: Matriz de recompensas: MCS 21 de 20dB a 28 dB.

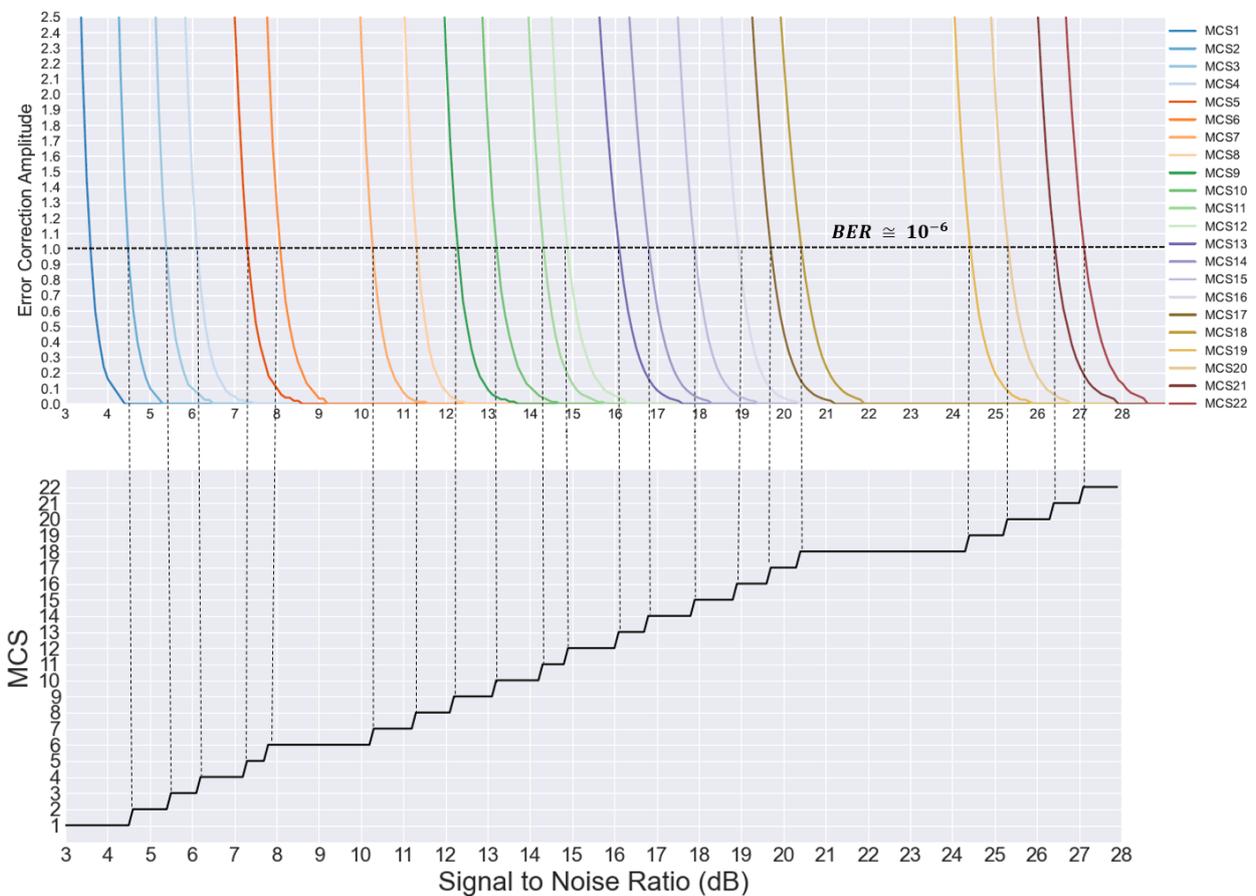


Figura 62: Resposta utilizando *Q-Learning* com ECA em função da SNR

O processo de equalização em sistemas OFDM utiliza como referência os canais piloto para realizar o cálculo da matriz de estimação de canal. A partir deste ponto, técnicas de interpolação são utilizadas para a determinação da resposta equalizada nos canais de dados. Este processo tende a introduzir erros que, muitas vezes, são significativos. Quanto maior o espaçamento entre os pilotos, maior poderá ser a magnitude deste erro. Diversas técnicas de estimação de SNR, por sua vez, utilizam estes canais pilotos, preâmbulos e prefixos cíclicos para determinação do nível de interferência e ruído. Como nestes casos não são levados em conta estes

fatores, ocorrem subestimações que acabam por interferir na escolha mais apropriada de índice de MCS. É possível conviver com tais imprecisões estabelecendo valores de histerese para limites de decisão, porém, quando os erros gerados pelos processos de recepção são pequenos, há perdas de eficiência espectral. Assim, para analisar o comportamento do sistema utilizando os algoritmos propostos, foram estabelecidas simulações onde valores de subestimação são introduzidos artificialmente. No caso da Figura 63, são apresentados os resultados obtidos para a BER em relação a SNR com subestimação de 0,5 dB.

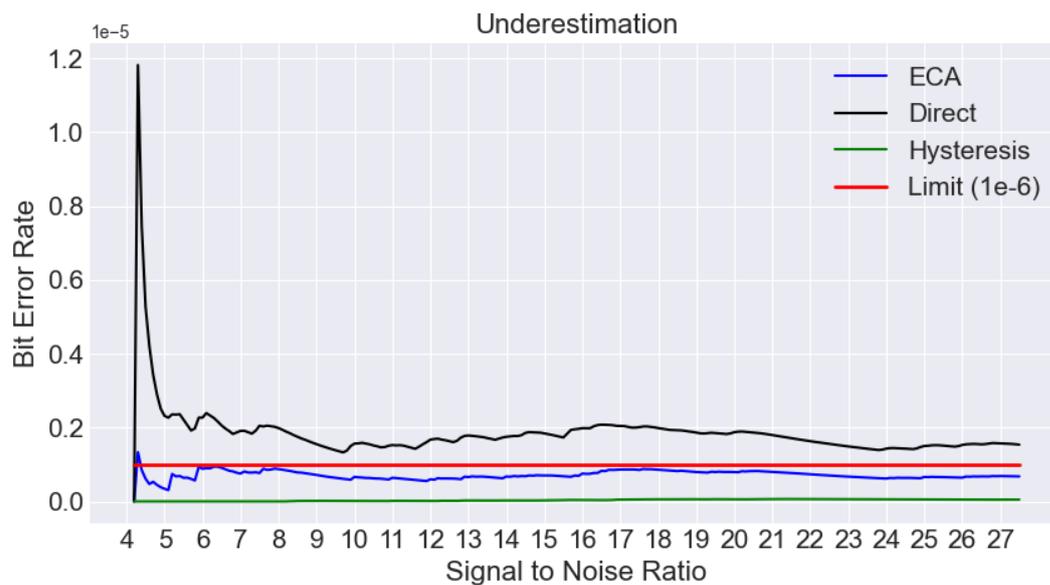


Figura 63: Subestimação de SNR = 0,5 dB.

A partir das simulações obtidas neste cenário, foram computados o total de bits transmitidos em cada tipo de controle de índice de MCS, como também o comportamento da BER e os respectivos índices de atingimento de meta. Para fins de contabilização deste atingimento foi considerado como limiar máximo aceitável um valor menor que 10% da meta, ou seja, para cada intervalo de SNR foi analisado se a taxa estabelecida de BER estava dentro deste limite. A Tabela 6 apresenta os resultados com o percentual de intervalos que atingiram esta meta e o número de bits de *payload* transmitidos.

Tabela 6: Bits transmitidos com subestimação de SNR.

Modo	Bits transmitidos (Mb)	Meta %
Direto	11,134	0,43
ECA	10,918	99,57
Histerese	10,372	100,00

É possível verificar que o modo direto, baseado somente nos limites de SNR, ultrapassou significativamente o limite alvo de 10^{-6} . O percentual de acréscimo de bits transmitidos para os casos de medida de SNR com erro de subestimação foi de 5,26%, quando comparado ao controle tradicional com histerese de 1,5dB, sem que a meta fosse comprometida.

3.3.4 Decisão Indireta e Considerações sobre o Uso de *Deep Q-Learning*

Os algoritmos destinados às abordagens com decisão indireta serão objeto de implementação futura, pois dependem de aspectos de infraestrutura de software e compatibilização de ferramentas e de sistemas. Dando sequência à técnica de RL, podem ser feitas melhorias quanto ao algoritmo de *Q-Learning*. Uma delas é a adaptação contínua da matriz de recompensas. Porém, há algumas desvantagens na utilização desta técnicas. Uma delas é a utilização compulsória de discretização. Assim, foram utilizados passos de 0.1dB para o SNR e valores de ECA de 0 a 6 com passos de 0.1. Este cenário apresenta uma matriz de *Q-values* considerável, o que demanda um período muito grande de aprendizado para a convergência de valores. Em consideração a estes pontos, sobre as vantagens da técnica de *Deep Q-Learning*, podemos citar:

- i) Não discretização dos valores Q;
- ii) Menor tempo de convergência;
- iii) Melhor definição na decisão de limites de transição de MCS.
- iv) Solução convergente para a implementação da proposta para geração de tabela com decisão indireta.

Os valores de Q para *fall back*, *fall forward* e manutenção de MCS, que determinam a melhor decisão a ser tomada, podem gerar valores indicativos para cálculo do grau ou probabilidade de atingimento da meta utilizando o atual índice de MCS. Valores podem ser também obtidos para índices imediatamente acima e abaixo, por exemplo, como mostra a Figura 64. Este exemplo pode ser estendido para os demais valores de MCS.

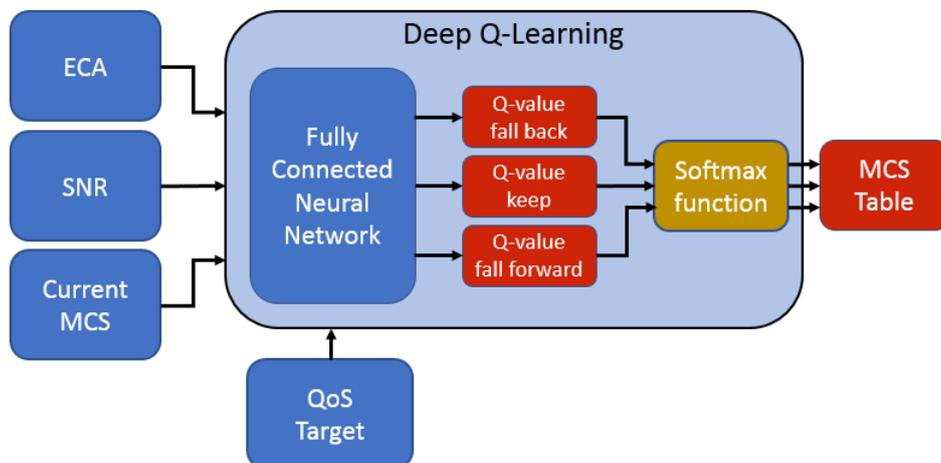


Figura 64: Exemplo de implementação utilizando *Deep Q-Learning*

Para a implementação de blocos utilizando bibliotecas Python voltadas a aplicações de IA, será necessário realizar atualizações na plataforma GNU Radio. Na próxima seção estão descritas, além das ações relativas a este aspecto, questões adicionais que precisam ser consideradas em termos de software e sistemas.

3.4 Atualização da Plataforma

Como mencionado, a equipe do projeto Brasil 6G adotou a plataforma desenvolvida em [30] para implementar novas soluções inerentes às redes da próxima geração. Neste quesito, o aumento da taxa de dados e de usuários simultâneos e o uso de IA estão entre os focos principais dos pesquisadores envolvidos no projeto. No entanto, para permitir algumas destas

novas funcionalidades na plataforma, as ferramentas utilizadas terão que passar por um processo de atualização a nível de software. Entre as vantagens da realização deste processo é a modernização da plataforma, aumentado sua vida útil e tornando-a mais acessível a sistemas computacionais recentes.

A primeira atualização realizada consistiu na mudança do UHD 3.10 para a versão 4.1. O UHD é o programa que promove a interface lógica entre o GNU Radio e a USRP. De acordo com [38], a adoção de uma versão mais recente permitirá maximizar a exploração dos recursos disponíveis na USRP, ampliando, por exemplo, a banda de transmissão e a vazão de dados. No entanto, a implementação do UHD 4.1 exige a instalação do Python 3. Desta forma, a segunda atualização realizada consistiu na migração do Python 2 para o Python 3. Apesar da semelhança, a sintaxe entre as versões mudou significativamente, exigindo cuidado no processo de migração do código previamente desenvolvido. Além disso, a alteração na versão do Python é essencial para integrar técnicas avançadas de IA e aprendizado de máquinas, como as soluções apresentadas na seção 3.3. Por fim, a adoção do Python 3 implicou também na alteração da ferramenta GNU Radio para a versão 3.9. Entre as versões 3.7 e 3.9, o GNU Radio passou por grandes mudanças estruturais que afetaram, principalmente, a arquitetura dos blocos. Assim, no processo de migração, foi necessário ajustar o código fonte de todos os blocos desenvolvidos para esta nova arquitetura. A validação dos blocos foi realizada a partir de uma simulação da RAN que avaliava a taxa de erro de bit diante da variação da SNR.

Com esta modernização, a plataforma do transceptor está apta para agregar novas funcionalidades inerentes às redes 6G, utilizando os mesmos equipamentos da plataforma anterior. Os objetivos das próximas etapas serão implementar as otimizações do MAC e os recursos de IA neste novo sistema e avaliar sua performance em cenários reais comunicação.

4 Conclusão

Para que as Redes 6G se tornem uma realidade, diversos desafios científicos e tecnológicos deverão ser superados. Este relatório de pesquisa apresentou as mais recentes contribuições dos pesquisadores do Projeto Brasil 6G nos diversos sistemas que poderão fazer parte do sistema de comunicação das futuras redes móveis. Dentre as mais diversas contribuições, aquelas relacionadas à rede de acesso merecem destaque. Essa rede de acesso, responsável por viabilizar a comunicação com o usuário final, terá que se basear em novos esquemas de transmissão digital, englobando modelagem de canal, codificação, modulação, formas de ondas, múltiplo acesso e parametrização inteligente. Será necessário explorar toda e qualquer oportunidade espectral para conseguir atender os vários requisitos conflitantes provenientes das diversas aplicações. Os modelos de canais propostos ao longo deste relatório mostram que conhecer o comportamento estatístico do canal permite não só projetar esquemas de comunicação mais robustos, como também permite realizar a predição de cobertura mais precisa, permitindo dimensionar adequadamente os enlaces visando melhor cobertura e redução de interferências. O sensoriamento espectral também será essencial, não só para explorar as oportunidades de comunicação nos canais de TV ociosos na faixa de UHF, mas também para coexistir de forma harmoniosa com tecnologia legada em qualquer outra faixa de frequência. O uso de esquemas MIMO será ainda mais importante nas redes 6G e superfícies inteligentes terão um papel importante na mitigação de falhas de cobertura, principalmente na faixas de frequência sub-THz. O direcionamento de feixe através de superfícies refletivas inteligentes terá um papel crucial para viabilizar uma cobertura adequada de sinais 6G operando em frequências elevadas. Apesar do uso massivo de antenas transmissoras ter o potencial de oferecer ganhos de multiplexação significativos, essa técnica somente poderá ser empregada quando o sistema estiver operando em frequências elevadas e os elementos dos arranjos de antenas puderem ser diminutos. Mas para os cenários operando em faixas de frequência mais baixa, será necessário elevar a eficiência espectral do sistema através do uso de novas formas de ondas da parametrização inteligente dos enlaces de comunicação. A forma de onda denominada de FTN-GFDM é capaz de aumentar significativamente a eficiência espectral do sistema de comunicação, enquanto que algoritmos baseados em IA podem determinar com maior precisão qual configuração do enlace em termos de ordem de modulação e taxa de codificação irá resultar no melhor desempenho, tendo em vista uma dada qualidade de serviço.

Além do amplo conjunto de contribuições científicas, o grupo de pesquisadores do projeto Brasil 6G trouxe contribuições significativas no desenvolvimento de um transceptor que esteja apto a demonstrar algumas das principais funcionalidades da rede de acesso. Esse transceptor é totalmente baseado no conceito de rádio definido por software, tornando-o flexível para se moldar aos diferentes cenários. Diversas otimizações foram realizadas nas camadas física, de enlace e IPC deste transceptor, tornando-o apto a atender múltiplos usuários em situações reais de operação. Com isso, será possível avaliar o desempenho em campo das soluções propostas ao longo deste projeto de pesquisa, considerando todas as intempéries introduzidas pelo canal de comunicação em uma situação real. Além disso, diversos algoritmos baseados em IA foram desenvolvidos para otimizar a configuração do enlace a partir da estimativa da relação sinal-ruído. Com isso, o melhor esquema de codificação de canal e modulação podem ser selecionados para os enlaces de cada usuário, permitindo atender a uma dada demanda por qualidade de serviço com maior eficiência espectral e energética.

Referências

- [1] A. C. de Oliveira Jr and et al, “Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G,” <http://inatel.br/brasil6G>, Projeto Brasil 6G, Tech. Rep., 2021.
- [2] D. Silva and et al, “Estado da Arte da Camada Física para Redes de Acesso 6G,” <http://inatel.br/brasil6G>, Projeto Brasil 6G, Tech. Rep., 2021.
- [3] A. S. Jr and et al, “Tecnologias de RF e de Comunicações Ópticas para Redes 6G,” <http://inatel.br/brasil6G>, Projeto Brasil 6G, Tech. Rep., 2021.
- [4] A. R. R. Marins and et al, “Estado da Arte em Inteligência Artificial Aplicada a Redes 6G,” <http://inatel.br/brasil6G>, Projeto Brasil 6G, Tech. Rep., 2021.
- [5] T. A. Moreira de Bairros, M. B. Loscilia, A. P. de Oliveira, D. C. de Souza e Silva, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, “The μ process type I,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 3, pp. 510–514, 2020.
- [6] T. A. M. de Bairros, M. B. Loscilia, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, “A new look at the η - μ fading model,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 1008–1012, 2021.
- [7] P. Gória, R. Souza, D. Costa, J. Moualeu, and M. Yacoub, “Error probability of m-phase signaling with phase noise over fading channels,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP, pp. 1–1, 04 2020.
- [8] T. R. R. Marins, A. A. D. Anjos, C. R. N. D. Silva, V. M. R. Peñarrocha, L. Rubio, J. Reig, R. A. A. De Souza, and M. D. Yacoub, “Fading evaluation in standardized 5g millimeter-wave band,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67 268–67 280, 2021.
- [9] L. dos Santos Costa and R. A. de Souza, “Performance-traffic-trade-off of two novel hard decision and two soft decision fusion periodogram-based algorithms for cooperative spectrum sensing under unreliable reporting channel,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 14, pp. 1683–1695(12), November 2020. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2019.0907>
- [10] L. S. Costa, D. A. Guimarães, E. P. Frigieri, and R. A. A. de Souza, “Weighted circular folding cooperative power spectral density split cancellation algorithm,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 1062–1066, 2021.
- [11] D. A. Guimarães, “Pietra-ricci index detector for centralized data fusion cooperative spectrum sensing,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 12 354–12 358, 2020.
- [12] D. A. Guimarães, E. J. T. Pereira, A. M. Alberti, and J. V. Moreira, “Design guidelines for database-driven internet of things-enabled dynamic spectrum access,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/3194>
- [13] F. A. P. de Figueiredo, M. S. P. Facina, R. C. Ferreira, Y. Ai, R. Ruby, Q.-V. Pham, and G. Fraidenraich, “Large intelligent surfaces with discrete set of phase-shifts communicating through double-rayleigh fading channels,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 20 768–20 787, 2021.

- [14] R. C. Ferreira, M. S. P. Facina, F. A. P. De Figueiredo, G. Fraidenraich, and E. R. De Lima, “Bit error probability for large intelligent surfaces under double-nakagami fading channels,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 750–759, 2020.
- [15] R. Coelho Ferreira, M. S. P. Facina, F. A. P. de Figueiredo, G. Fraidenraich, and E. R. de Lima, “Large intelligent surfaces communicating through massive mimo rayleigh fading channels,” *Sensors*, vol. 20, no. 22, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/22/6679>
- [16] R. C. Ferreira, M. S. P. Facina, F. A. P. de Figueiredo, G. Fraidenraich, and E. R. de Lima, “Secrecy analysis and error probability of lis-aided communication systems under nakagami-m fading,” *Entropy*, vol. 23, no. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/10/1284>
- [17] A. R. Facina, R. Tancredo, M. S. P. Facina, and G. Fraidenraich, “Comunicação LoRa na Zona Rural: Análise Baseada em uma Campanha de Medição no Noroeste Paulista,” in *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, 2021.
- [18] R. M. M. Kagami and L. L. Mendes, “A Low-Complexity Deep Neural Network for Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio Estimation,” in *Anais do I Workshop de Redes 6G (W6G 2021)*, 2021.
- [19] E. J. dos Santos Junior, R. D. Souza, and J. L. Rebelatto, “Hybrid multiple access for channel allocation-aided embb and urlc slicing in 5g and beyond systems,” *Internet Technology Letters*, vol. 4, no. 6, p. e294, 2021. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/itl2.294>
- [20] V. D. Pegorara Souto, R. D. Souza, B. F. Uchôa-Filho, A. Li, and Y. Li, “Beamforming optimization for intelligent reflecting surfaces without csi,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 1476–1480, 2020.
- [21] V. D. P. Souto, S. Montejo-Sánchez, J. L. Rebelatto, R. D. Souza, and B. F. Uchôa-Filho, “IRS-Aided physical layer network slicing for URLLC and eMBB,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2021.
- [22] F. A. Tondo, S. Montejo-Sánchez, M. E. Pellenz, S. Céspedes, and R. D. Souza, “Direct-to-satellite iot slotted aloha systems with multiple satellites and unequal erasure probabilities,” *Sensors*, vol. 21, no. 21, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/7099>
- [23] E. J. Dos Santos, R. D. Souza, and J. L. Rebelatto, “Rate-splitting multiple access for URLLC uplink in physical layer network slicing with eMBB,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2021.
- [24] M. B. d. M. de Mello and L. L. Mendes, “Deep Neural Network Parameterization for Channel Estimation in MUSA Systems,” in *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, 2021.
- [25] M. Mello and L. Mendes, “Low-Complexity Detectors Applied to FTN-GFDM Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, to be submitted.

- [26] L. R. Abbade, F. M. Ribeiro, M. H. d. Silva, A. F. P. Morais, E. S. d. Morais, E. M. Lopes, A. M. Alberti, and J. J. P. C. Rodrigues, “Blockchain applied to vehicular odometers,” in *IEEE Network*, vol. 34, no. 1, 2020, pp. 62–68.
- [27] T. B. da Silva, R. S. Chaib, A. C. S., R. d. R. Righi, and A. M. Alberti, “Towards future internet of things experimentation and evaluation,” in *IEEE Internet of Things Journal*, 2021.
- [28] D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. J. P. C. Rodrigues, A. B. Lugli, and A. M. Alberti, “Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in industry 4.0: A literature review,” in *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, 2021, pp. 176–192.
- [29] D. J. Cuba-Zúñiga, S. B. Mafra, and J. R. Mejía-Salazar, “Cooperative full-duplex v2v-vlc in rectilinear and curved roadway scenarios,” *Sensors*, vol. 20, no. 13, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/13/3734>
- [30] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) - Inatel, “Atividade 4.3 - Demonstração do funcionamento da rede 5G no cenário de aplicações de IoT em áreas remotas e áreas rurais, com a implementação de uma rede piloto,” *5G IoT*, Agosto 2020.
- [31] —, “Atividade 1.2 - Levantamento das aplicações de pesquisa no ambiente do agronegócio que possam ser beneficiadas por soluções de IoT e por soluções de conectividade de longo alcance,” *5G IoT*, Março 2019.
- [32] —, “Atividade 2.4 - Definição das técnicas de camadas física e MAC a serem implementadas no protótipo do modem 5G,” *5G IoT*, Janeiro 2020.
- [33] —, “Atividade 3.6 - Ajustes das implementações da solução integrada para melhoria de desempenho e finalização do projeto,” *5G IoT*, Janeiro 2019.
- [34] —, “Atividade 4.1 - Desenvolvimento de um conjunto de serviços e aplicações de IoT voltados para o cenário de áreas remotas e áreas rurais,” *5G IoT*, Abril 2020.
- [35] —, “Atividade 1.5 - Definição das aplicações que serão utilizadas nos testes de campo e rede piloto,” *5G IoT*, Maio 2019.
- [36] —, “Atividade 4.2 - Testes de campo e análise de desempenho da rede 5G no cenário de aplicações de IoT em áreas remotas e áreas rurais,” *5G IoT*, Abril 2020.
- [37] W. Dias, A. Ferreira, R. Kagami, J. S. Ferreira, D. Silva, and L. Mendes, “5g-range: A transceiver for remote areas based on software-defined radio,” in *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2020, pp. 100–104.
- [38] H. Nelson. (2020) More Flexibility and Resources with UHD 4.0. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/announcing-uhd4/>