



Projeto Brasil 6G Fase III

Atividade 4.2 Implementação de tecnologias para testes em campo - Parte 1



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	01/07/2025	Anderson Reis Rufino Marins Diego Gabriel Soares Pivoto William Orivaldo Faria Carvalho	Elaboração de conteúdo
2	18/07/2025	Jorge Ricardo Mejia Salazar Juliano Silveira Ferreira Luciano Leonel Mendes Luiz Gustavo Barros Guedes	Revisão de conteúdo

Lista de Figuras

1	Diagrama geral de integração da <i>Base Station</i> (BS) da rede de acesso do Projeto Brasil Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G) com a base de dados georreferenciada de TV <i>White Space</i> (TVWS).	4
2	Abas da interface gráfica responsáveis pela configuração inicial dos transceptores da rede acesso do Projeto Brasil 6G.	7
3	Abas da interface gráfica para gerenciamento e inicialização dos transceptores, e execução de testes de conectividade na rede de acesso do Projeto Brasil 6G. . . .	8
4	Diagrama ilustrativo da comunicação via protocolo <i>Protocol to Access White Space</i> (PAWS) entre a interface de rádio e a base de dados TVWS para inicialização e verificação de disponibilidade espectral para uso.	10
5	Aba da interface gráfica para inserção de parâmetros de inicialização da comunicação entre a rede de acesso do Projeto Brasil 6G e a base de dados TVWS. .	12
6	Aba da interface gráfica para inicialização da comunicação com a base de dados de TVWS e visualização das faixas de frequência selecionadas para operação na rede de acesso.	14
7	Símbolos 16QAM : (a) símbolos 16QAM sem DFT e (b) símbolos 16QAM com DFT.	16
8	Implementação da DFT na transmissão de dados do Transceptor Brasil 6G. . . .	17
9	Implementação da IDFT na recepção de dados do Transceptor Brasil 6G. . . .	17
10	Avaliação teórica da pré-codificação por DFT: curva da PAPR simulada no MATLAB®.	18
11	Curva da PAPR do transceptor com DFT com dimensão igual a 3.	20
12	Curva da PAPR do transceptor com DFT com dimensão igual ao número de subportadoras úteis ou de dados do usuário.	20
13	Curva da PAPR do transceptor com e sem pré-codificação DFT para espaçamento de 32 subportadoras entre pilotos.	21
14	Interface do Comsol Multiphysics®.	24
15	(a) Esquemático do algoritmo de simulação de uma célula unitária com PMLs nos domínios superior e inferior, condições de periodicidade nas laterais, portas para transmissão e recepção da onda eletromagnética e os materiais utilizados. (b) Parâmetros geométricos da célula unitária.	25
16	Sequência da prototipagem da metassuperfície.	25
17	(a) Arranjo experimental para a medição do coeficiente de transmissão da metassuperfície. (b) Comparação dos resultados da simulação com os do experimento. .	26

Acrônimos

6G Sexta Geração de Rede Móvel Celular

AGL *Above Ground Level*

Anatel Agência Nacional de Telecomunicações

BAN *Body Area Network*

BS *Base Station*

CCDF *Complementary Cumulative Distribution Function*

COGEU *COGNitive radio systems for efficient sharing of TV white spaces in EUropean context*

DCT *Discrete Cosine Transform*

DFT *Discrete Fourier Transform*

DST *Discrete Sine Transform*

FEM *Finite Element Method*

GFDM *Generalized Frequency Division Multiplexing*

GPS *Global Positioning System*

GUI *Graphic User Interface*

IDFT *Inverse Discrete Fourier Transform*

IETF *Internet Engineering Task Force*

IIT Bombay *Indian Institute of Technology Bombay*

IoT *Internet of Things*

ISDB-T *Integrated Services Digital Broadcasting–Terrestrial*

JSON *JavaScript Object Notation*

LP *Linearmente Polarizada*

MAC *Media Access Control*

MCS *Modulation and Coding Scheme*

MIMO *Multiple-Input and Multiple-Output*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OOBE *Out-of-Band Emission*

PAPR *Peak-to-Average Power Ratio*

PAWS *Protocol to Access White Space*

PML *Perfectly Matched Layer*

PTS *Partial Transmission Sequence*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*

RF *Radio Frequency*

RFC *Request for Comments*

RIS *Reconfigurable Intelligent Surface*

SDR *Software Defined Radio*

SLM *Selective Mapping*

TVWS *TV White Space*

UE *User Equipment*

UFC *Universidade Federal do Ceará*

UHF *Ultra High Frequency*

VNA *Vector Network Analyzer*

WET *Wireless Energy Transfer*

WET *Wireless Energy Transfer*

Sumário

1	Introdução	1
2	Integração com banco de dados de TVWS	3
2.1	Módulo para configuração operacional, inicialização e testes de conectividade da rede de acesso	5
2.2	Módulo para estrutura de comunicação entre BS e base de dados georreferenciada de TVWS	9
3	Esquemas de redução de PAPR	15
3.1	Implementação da técnica de pré-codificação para redução de PAPR no Transceptor Brasil 6G	16
3.1.1	Resultados de Simulação Computacional	18
3.1.2	Resultados no GNU Radio	19
4	Pesquisa e Implementação de Metassuperfícies	22
4.1	Princípios	22
4.2	Metodologia	23
4.2.1	Simulações de Metassuperfícies Flexíveis	23
4.2.2	Prototipagem	25
4.2.3	Medições de Metassuperfícies Flexíveis	26
4.3	Resultados	26
5	Conclusão	28

1 Introdução

O Projeto Brasil 6G contempla a concepção e o desenvolvimento de uma plataforma para a realização de experimentações e testes com diferentes tecnologias candidatas à composição da futura rede de comunicações, a 6G. O presente relatório refere-se à execução da Atividade 4.2, prevista na Fase III do Projeto Brasil 6G, e tem como objetivo a implementação prática de soluções tecnológicas voltadas à evolução das redes de comunicação. Essa implementação visa permitir a realização de testes em condições realistas, de modo a viabilizar a validação e avaliação de desempenho das tecnologias envolvidas.

Entre as tecnologias avaliadas até o momento da elaboração deste relatório, destaca-se o desenvolvimento de uma rede de acesso inovadora com foco em prover conectividade para áreas remotas e rurais, conforme descrito nos relatórios da Fase II do Projeto Brasil 6G [1, 2]. A rede de acesso em desenvolvimento pelo Inatel adota, inicialmente, a faixa de *Ultra High Frequency* (UHF) para testes, avaliação e demonstração. Essa faixa foi selecionada por favorecer a comunicação em longas distâncias, devido à menor atenuação do sinal no espaço livre em comparação com frequências mais elevadas. No Brasil, essa faixa é utilizada principalmente por emissoras e retransmissoras de TV Digital, no padrão Integrated Services Digital Broadcasting–Terrestrial (ISDB-T) [3].

O uso compartilhado do espectro com o sistema de TV caracteriza a solução proposta pelo Inatel como um sistema inovador de TVWS. A operação harmônica da rede de acesso com os sistemas de TV, respeitando os canais licenciados aos usuários primários, é fundamental. Para possibilitar o compartilhamento eficiente do espectro, foi utilizada uma base de dados de TVWS, que fornece informações sobre as frequências disponíveis e não licenciadas destinadas ao uso secundário. Neste contexto, foi realizada a integração da rede de acesso com uma base de dados de TVWS, permitindo a sua operação em frequências apropriadas. A execução da atividade contemplou ainda o estudo de protocolos e a implementação de uma interface de software para essa integração, conforme será detalhado ao longo do relatório.

A otimização do nível de potência de transmissão é outro aspecto essencial em sistemas de radiocomunicação, com impacto direto na área de cobertura e nos custos de implantação. A utilização de formas de onda multiportadoras, como o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [4] e o *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM) [4, 5], apresenta como desafio a elevada *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR), definida como a razão entre o valor de pico e a potência média do sinal. Tecnologias que promovem a redução da PAPR possibilitam o uso de potências médias mais elevadas, otimizando o consumo energético e favorecendo a comunicação em longas distâncias. Considerando que, no Brasil, a Anatel estabelece para sistemas de TVWS um limite de potência de 1 W de pico à saída da antena, conforme o Anexo à Resolução nº 747 [6], a redução da PAPR torna-se ainda mais relevante. Assim, esta fase do Projeto Brasil 6G inclui a investigação, implementação e avaliação de técnicas de redução de PAPR para integração com a rede de acesso.

Entre as tecnologias emergentes com potencial de habilitar as redes futuras, destacam-se também as metasuperfícies. Essas estruturas podem ser utilizadas para ampliar a cobertura, controlar a propagação do sinal e desempenhar outras funcionalidades específicas. Nesse contexto, o Projeto Brasil 6G contempla também o desenvolvimento e a avaliação prática de soluções baseadas em metasuperfícies.

Visando alcançar os objetivos citados, o presente relatório foi organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta detalhes sobre o protocolo e mecanismos de acesso associados à integração da rede de acesso com um banco de dados de TVWS; a Seção 3 apresenta a pro-

posta de uma técnica de redução de PAPR para ser integrada na rede de acesso, bem como sua avaliação prática inicial; a Seção 4 apresenta as pesquisas em implementações envolvendo metasuperfícies; finalmente, a Seção 5, apresenta as considerações finais e as principais conclusões do relatório.

2 Integração com banco de dados de TVWS

O Projeto Brasil 6G tem como uma de suas metas estratégicas o desenvolvimento de soluções de conectividade avançada capazes de atender às necessidades específicas de regiões remotas e carentes de infraestrutura de telecomunicações no território brasileiro. Nesse contexto, o projeto propõe a implementação de uma rede de acesso sem fio de longo alcance, voltada para a inclusão digital e a viabilização de serviços tecnológicos essenciais em áreas rurais e isoladas. A arquitetura dessa rede é baseada em um sistema composto por uma BS, que atua como transceptor central, e *User Equipments* (UEs) distribuídos geograficamente, os quais se conectam à estação rádio-base por meio de enlaces de radiofrequência.

Essa infraestrutura de comunicação é projetada para operar com elevada eficiência espectral e alcance estendido, proporcionando conectividade robusta a localidades anteriormente não assistidas por redes comerciais. Tal conectividade é fundamental para habilitar aplicações emergentes no meio rural, como o *smart farming*, o monitoramento ambiental por meio de sensores *Internet of Things* (IoT), educação à distância, telemedicina, entre outras iniciativas que impulsionam o desenvolvimento socioeconômico dessas regiões. O uso de tecnologias de acesso sem fio adaptadas para grandes distâncias, com requisitos mínimos de infraestrutura fixa, é a chave para a universalização dos serviços digitais no país, particularmente em zonas de baixa densidade populacional.

Para atender a esses requisitos de propagação e cobertura, a rede de acesso do Projeto Brasil 6G adota, de forma estratégica, faixas de frequências mais baixas que as tradicionalmente utilizadas pelas redes móveis comerciais, especialmente a faixa de UHF. A escolha por operar nessas frequências se justifica, conforme mencionado, pelas características de propagação mais favoráveis uma vez que o sinal sofre menor atenuação em espaço livre. Esta faixa de frequência tem como usuários primários o sistema de Televisão, conforme destacado anteriormente. Entretanto, devido à desocupação de muitos canais em áreas rurais e à transição tecnológica de sistemas analógicos para digitais, parte significativa desse espectro tornou-se subutilizada. Essa condição favorece a implementação de soluções baseadas em TVWS.

O conceito de TVWS refere-se a faixas desocupadas no espectro de radiodifusão televisiva, que podem ser empregados de maneira oportunista por sistemas secundários de comunicação, desde que não causem interferência aos usuários primários. Nas zonas remotas e rurais do Brasil, verifica-se uma ampla disponibilidade desses canais livres, o que representa uma oportunidade única para expandir a cobertura da rede de acesso com baixos custos e alta eficiência espectral. Ao utilizar os canais de TV não ocupados, o Projeto Brasil 6G inaugura um modelo de rede de acesso dinâmica e adaptativa, tornando-se referência na exploração inovadora do espectro.

Para que o uso do espectro TVWS seja seguro, confiável e em conformidade com as regulamentações vigentes, é imprescindível a integração da rede de acesso com uma base de dados georreferenciada de TVWS. Este tipo de banco de dados armazena informações sobre a ocupação atual das faixas de UHF por serviços primários de radiodifusão, e fornece, com base na localização geográfica da BS, uma lista de canais disponíveis que podem ser alocados para comunicação secundária sem causar interferência. A presença de um sistema de consulta em tempo real à essa base de dados é essencial para que o transceptor da BS selecione, de forma automatizada, as faixas de *uplink* e *downlink* mais apropriadas à operação naquele ponto específico do território.

Diversos países têm desenvolvido projetos pioneiros de bases de dados geolocalizadas para gerenciamento dinâmico de TVWS, visando ampliar o acesso à internet em áreas remotas. O OpenPAWS, desenvolvido pelo *Indian Institute of Technology Bombay* (IIT Bombay), é a

primeira implementação de uma base de dados pública de TVWS na Índia [7]. A plataforma é de código aberto e compatível com o protocolo PAWS, permitindo a operação de dispositivos secundários sem causar interferência às transmissões primárias.

Já o projeto *COGnitive radio systems for efficient sharing of TV white spaces in EUropean context* (COGEU), financiado pela União Europeia, estabeleceu uma arquitetura de base de dados para alocação dinâmica de espectro [8]. A iniciativa propôs mecanismos de negociação secundária de espectro e proteção de serviços primários, visando a harmonização do uso de TVWS na Europa.

A Agência Nacional do Espectro da Colômbia estabeleceu uma base de dados de TVWS, que consiste de uma plataforma que permite a consulta de canais disponíveis para dispositivos secundários [9]. A iniciativa visa aumentar a eficiência do espectro e promover a conectividade em áreas rurais.

No Brasil, a *Universidade Federal do Ceará* (UFC) desenvolveu uma base de dados de TVWS georreferenciada compatível com o protocolo PAWS (*Request for Comments* (RFC) 7545). Essa iniciativa visa ampliar a inclusão digital em áreas remotas por meio do uso eficiente dos espaços em branco de TV. Com esse objetivo, foi implementado, no âmbito do Projeto Brasil 6G, um *software* de integração entre a rede de acesso e a base de dados de TVWS desenvolvida pela UFC, cujo funcionamento constitui o foco central desta seção do relatório. A Figura 1 ilustra o diagrama geral para a integração da BS da rede de acesso do Projeto Brasil 6G com a base de dados georreferenciada de TVWS.

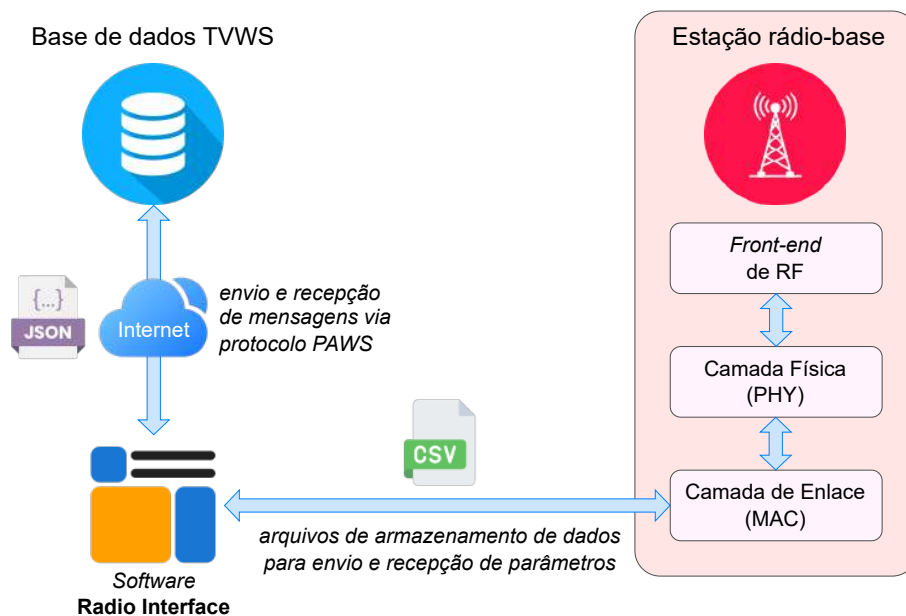


Figura 1: Diagrama geral de integração da BS da rede de acesso do Projeto Brasil 6G com a base de dados georreferenciada de TVWS.

Conforme ilustrado na Figura 1, a BS é responsável pela execução das etapas de processamento do transceptor, abrangendo desde o *front-end* de *Radio Frequency* (RF) até as camadas física e de enlace. Durante esse processo, a estação rádio-base gera e disponibiliza, por meio de arquivos de armazenamento local, um conjunto de parâmetros operacionais relevantes para a operação da rede. Paralelamente, o *software* de integração, denominado “*Radio Interface*”,

realiza o monitoramento contínuo desses arquivos, extraindo informações essenciais da rede de acesso — como coordenadas geográficas (latitude e longitude), identificadores dos equipamentos, entre outros — e as transmite para a base de dados de TVWS utilizando o protocolo PAWS que é um protocolo regulamentado pelo padrão internacional *Internet Engineering Task Force* (IETF) RFC 7545 [10]. Vale destacar que a adoção de um protocolo internacional para intercomunicação de banco de dados torna a solução compatível com outros dispositivos e soluções comerciais.

De forma recíproca, a base de dados TVWS responde com mensagens contendo informações de controle, incluindo os canais disponíveis na localidade consultada e suas respectivas faixas de frequência aptas para operação. Essas informações são então processadas pelo *software* “*Radio Interface*”, que reestrutura os dados recebidos e os armazena em arquivos acessíveis à camada de enlace do transceptor. Dessa forma, os parâmetros necessários para a configuração dinâmica dos rádios da rede de acesso são devidamente disponibilizados, assegurando a correta adaptação espectral de acordo com a localização geográfica e a ocupação do espectro na região.

Como apresentado anteriormente, o *software* de integração entre a rede de acesso e a base de dados de TVWS constitui uma ferramenta essencial para viabilizar a operação dinâmica e eficiente da rede em conformidade com a disponibilidade espectral local. Esse sistema garante que os transceptores operem em faixas de frequência apropriadas, sem causar interferência aos serviços primários, ao mesmo tempo em que maximiza o aproveitamento dos canais desocupados na região de implantação.

Sendo assim, o objetivo desta seção é apresentar o detalhamento técnico do *software* desenvolvido, bem como suas funcionalidades centrais, que se organizam em dois módulos principais:

- i. Um módulo unificado para inicialização, configuração de parâmetros essenciais e testes de conectividade entre os elementos da rede, assegurando que os transceptores estejam corretamente configurados e operacionais.
- ii. Uma estrutura de comunicação entre a estação rádio-base e a base de dados externa de TVWS, que permite a consulta automatizada da disponibilidade espectral, a seleção das faixas livres, e a consequente configuração dinâmica da rede de acesso com base na localidade geográfica e no estado atual do espectro.

Essa abordagem promove um uso mais eficiente e inteligente do espectro de rádio, potencializa a confiabilidade da comunicação, reduz a possibilidade de interferências e amplia as possibilidades de implementação de sistemas de radiocomunicação em áreas remotas.

As subseções a seguir detalham os dois principais módulos do *software* desenvolvido. A primeira subseção aborda o sistema de configuração operacional, inicialização e verificação da conectividade entre os transceptores, incluindo a definição de parâmetros como a identificação dos nós, alocação de recursos, configurações para *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO), entre outros. A segunda subseção, por sua vez, descreve a arquitetura de comunicação entre a BS e a base de dados de TVWS, destacando os protocolos empregados, a lógica de consulta, e a dinâmica de adaptação espectral conforme os dados obtidos.

2.1 Módulo para configuração operacional, inicialização e testes de conectividade da rede de acesso

Conforme previamente descrito, o *software* denominado “*Radio Interface*”, desenvolvido com o propósito de realizar a integração entre a rede de acesso do Projeto Brasil 6G e a base de

dados de TVWS, incorpora entre suas principais funcionalidades um módulo dedicado à configuração operacional, inicialização e execução de testes de conectividade entre os transceptores que compõem a infraestrutura da rede.

Esse conjunto de funcionalidades é acessado por meio da interface gráfica de usuário ou *Graphic User Interface* (GUI) do sistema, organizada em diferentes abas, cada uma voltada para um aspecto específico de configuração e operação da rede. As abas da interface relacionadas a este módulo são: *Initial Settings*, *UE Settings*, *Network*, *Tests* e *Actions*. Por meio dessas abas, o operador pode realizar desde a definição dos parâmetros básicos de operação até a verificação funcional da comunicação entre os dispositivos de campo.

As abas *Initial Settings*, *UE Settings* e *Network* concentram-se na configuração operacional inicial dos transceptores, sendo fundamentais para viabilizar a comunicação entre a estação rádio-base e os terminais de usuário, e podem ser definidas da seguinte maneira:

- A aba *Initial Settings* permite a configuração dos parâmetros operacionais fundamentais do transceptor, incluindo a seleção do modo de operação do equipamento — como BS ou UE —, a definição do número de usuários conectados à rede, ajustes de periodicidade e temporização (*timeout*), entre outros parâmetros críticos para o correto processo de inicialização do dispositivo.
- Já a aba *UE Settings* é responsável pela definição das características técnicas dos terminais de usuário. Nela, o operador é capaz de atribuir os identificadores únicos para cada UE, configurar os parâmetros de alocação de recursos, inicializar o esquema de modulação e codificação (*Modulation and Coding Scheme* (MCS)), além de estabelecer configurações relacionadas à operação em múltiplas antenas (MIMO), quando aplicável.
- A aba *Network* permite configurar a infraestrutura de rede local vinculada ao terminal de usuário, quando este atua como ponto de distribuição de conectividade. Por meio dessa aba, é possível definir a função da UE como *gateway* de uma rede interna, operando com tecnologias como *Wi-Fi*, *LoRa*, entre outras, viabilizando a integração de dispositivos locais à Internet por meio do enlace de radiofrequência da rede de acesso do Projeto Brasil 6G. Essa funcionalidade amplia a flexibilidade da solução e possibilita a adoção de arquiteturas híbridas de acesso, especialmente relevantes em contextos de digitalização rural, como no uso de sensores IoT e aplicações de agricultura inteligente.

A Figura 2 apresenta a interface gráfica do módulo de configuração inicial, destacando as abas previamente descritas e seus recursos para a parametrização dos transceptores da rede de acesso do Projeto Brasil 6G.

The figure displays three screenshots of the 'IRI - Intel Radio Interface' software, showing different configuration tabs. The top-left screenshot shows the 'Initial Settings' tab, which includes fields for Operation Mode (BS/UE), Number of UEs, Numerology, Multiplexing Mode (OFDM/GFDM), FLut Matrix (Free/Busy), RxMetrics Periodicity, MTU, IP Timeout, SS Report Timeout, and ACK Timeout. The top-right screenshot shows the 'UE 1 Settings' tab, which includes fields for RB Allocation Parameters (Identification, RB Start, Number of RBs), MCS Parameters (MCS Downlink/Uplink), and MIMO Parameters (MIMO Activation, MIMO Mode, Number of Tx Antennas, Precoding Matrix Index, and Transmission Power Control). The bottom-left screenshot shows the 'Network' tab, which includes fields for Network Interface, Network IP, and an 'Update UE Network' button.

Figura 2: Abas da interface gráfica responsáveis pela configuração inicial dos transceptores da rede acesso do Projeto Brasil 6G.

Para o processo de inicialização dos transceptores da rede de acesso, a interface gráfica do *software* “*Radio Interface*” disponibiliza a aba *Actions*, a qual reúne um conjunto de comandos operacionais voltados à tomada de decisão e ao controle da execução dos códigos responsáveis pelas camadas física e de enlace do sistema baseado em *Software Defined Radio* (SDR). Por meio dessa aba, o operador pode acionar diretamente os processos que permitem a inicialização, reconfiguração ou interrupção dos transceptores, conforme necessário para o cenário de uso.

Entre as funcionalidades disponíveis, destacam-se os comandos de gerenciamento de estado do sistema, tais como o carregamento de configurações padrão e o armazenamento (salvamento) dos parâmetros operacionais atuais. Essas opções possibilitam que, em caso de reinicialização da interface, o usuário possa restaurar o ambiente ao seu estado anterior ou aplicar um conjunto de configurações previamente definido como referência, garantindo maior praticidade e consistência na operação.

Adicionalmente, a aba *Actions* contempla comandos para a execução automatizada de *scripts* essenciais ao funcionamento do sistema, incluindo:

- a recompilação do código da camada *Media Access Control* (MAC), necessária quando há modificações no *software* de enlace;
- a inicialização do transceptor, com possibilidade de escolha entre o uso de uma versão abstrata da camada física ou a ativação direta do *hardware* de rádio definido por *software* (SDR);
- e a interrupção controlada da operação do transceptor, finalizando o processo de comunicação de forma segura.

Após a etapa de configuração operacional e inicialização dos transceptores, o *software* “*Radio Interface*” também permite a execução de testes de desempenho de rede, os quais podem ser realizados diretamente por meio da interface gráfica, na aba *Tests*. Essa seção da interface apresenta uma lista de opções (*checkboxes*) correspondentes a cada dispositivo conectado à rede, sejam eles estações rádio-base (BS) ou terminais de usuário (UEs). O operador pode selecionar individualmente os equipamentos que participarão dos testes, oferecendo assim flexibilidade na avaliação do desempenho da comunicação entre os nós da rede.

As funcionalidades disponíveis nesta aba incluem:

- comandos de **ping**, utilizados para aferição da latência do enlace entre os dispositivos;
- e comandos **iperf3**, voltados à medição da vazão (*throughput*), com a possibilidade de configurar cada dispositivo como servidor ou cliente, permitindo a avaliação tanto do tráfego de *uplink* quanto de *downlink*.

Com base nas seleções feitas via *checkboxes*, os comandos são automaticamente adaptados para incluir os endereços IP dos dispositivos selecionados, garantindo agilidade e dinamismo no processo de teste, além de possibilitar diferentes combinações de topologias de avaliação em tempo real.

A Figura 3 apresenta as abas *Actions* e *Tests* da interface gráfica, evidenciando os recursos disponíveis para o gerenciamento operacional dos transceptores da rede de acesso do Projeto Brasil 6G, bem como as ferramentas integradas para a execução dos testes de conectividade entre os dispositivos.

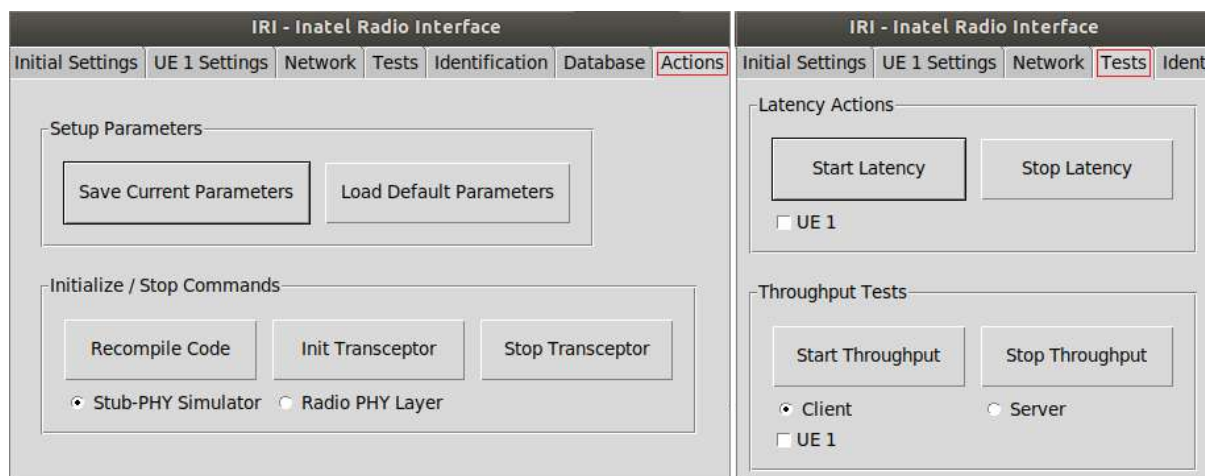


Figura 3: Abas da interface gráfica para gerenciamento e inicialização dos transceptores, e execução de testes de conectividade na rede de acesso do Projeto Brasil 6G.

Com a devida parametrização das abas da interface gráfica associadas ao módulo de configuração operacional, inicialização e testes de conectividade, detalhadas ao longo desta subseção, a rede de acesso encontra-se devidamente preparada para operar de forma funcional. Nesse estágio, a comunicação entre a estação rádio-base (BS) e os terminais de usuário (UEs) pode ser estabelecida de maneira eficiente, assegurando a troca de informações fundamentais para o funcionamento da rede. A partir desse ponto, torna-se viável a realização da integração entre a infraestrutura de acesso e a base de dados georreferenciada de TVWS, etapa crucial para a seleção dinâmica de canais livres conforme a localização geográfica. Os aspectos técnicos e arquiteturais dessa integração serão apresentados em detalhes na subseção a seguir.

2.2 Módulo para estrutura de comunicação entre BS e base de dados georreferenciada de TVWS

Após a realização das etapas de inicialização e configuração dos transceptores, torna-se necessário definir as faixas de frequência operacionais para os enlaces de *uplink* e *downlink*, de forma a habilitar a comunicação eficiente entre a estação rádio-base (BS) e os terminais de usuário (UEs) alocados na rede de acesso. Considerando que a solução proposta se fundamenta na utilização de canais livres do espectro de radiodifusão e em conformidade com as regulamentações vigentes, é imprescindível avaliar dinamicamente a disponibilidade espectral local antes de se proceder à alocação das faixas de operação.

Para viabilizar esse processo de verificação automatizada da ocupação do espectro, a rede de acesso desenvolvida no Projeto Brasil 6G estabelece comunicação com uma base de dados georreferenciada de TVWS, a qual mantém registros atualizados da utilização dos canais de UHF por sistemas primários (como emissoras de TV) em diversas localidades. A interação entre a BS e essa base de dados é realizada por meio de um protocolo de comunicação denominado PAWS, que, conforme citado anteriormente, é especificado pela norma IETF RFC 7545 [10], sendo amplamente adotado em soluções de redes secundárias baseadas em TVWS ao redor do mundo.

O protocolo PAWS define um conjunto de mensagens e procedimentos que permitem aos dispositivos secundários — como a BS da rede de acesso — consultar bases de dados de espectro georreferenciado, fornecendo sua localização geográfica, características operacionais e requisitos de comunicação. Em resposta, a base de dados retorna informações detalhadas sobre os canais livres disponíveis na região, bem como restrições de potência e largura de banda, assegurando que o dispositivo secundário opere sem causar interferência aos usuários licenciados do espectro. O objetivo principal do protocolo é garantir conformidade regulatória, operação eficiente e uso compartilhado do espectro de maneira segura e coordenada.

No contexto do Projeto Brasil 6G, o protocolo PAWS é empregado pelo *software* “*Radio Interface*”, que atua como intermediário entre a estação rádio-base e a base de dados de TVWS. A aplicação é responsável por construir e transmitir as mensagens de requisição conforme os parâmetros exigidos pelo protocolo, interpretar as respostas recebidas e, por fim, reestruturar os dados retornados para que sejam utilizados nos *scripts* de inicialização do transceptor. Esse processo permite a configuração automatizada das faixas de frequência disponíveis para cada localidade, com base na avaliação espectral em tempo real, promovendo flexibilidade, segurança e otimização na utilização do espectro.

A Figura 4 ilustra o modelo funcional implementado pelo *software* “*Radio Interface*”, que operacionaliza o protocolo PAWS para realizar a integração entre a rede de acesso e a base de dados de TVWS, englobando os processos de inicialização da comunicação, envio de requisições georreferenciadas e recepção das informações sobre a disponibilidade espectral.



Software Radio Interface:

Inicialização e avaliação de disponibilidade espectral via protocolo PAWS

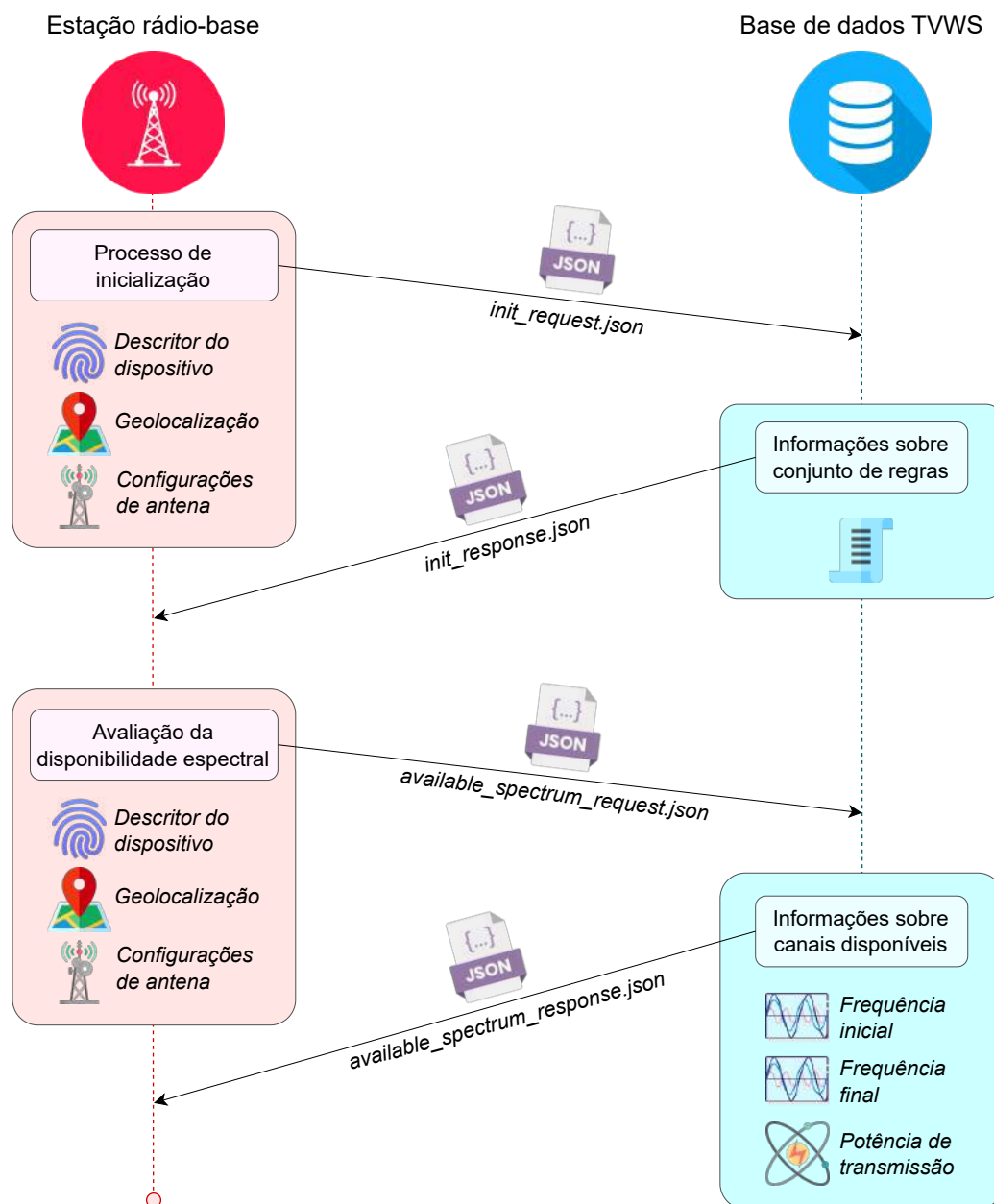


Figura 4: Diagrama ilustrativo da comunicação via protocolo PAWS entre a interface de rádio e a base de dados TVWS para inicialização e verificação de disponibilidade espectral para uso.

Conforme ilustrado na Figura 4, o processo de comunicação entre a estação rádio-base (BS) da rede de acesso e a base de dados georreferenciada de TVWS é realizado por meio do protocolo PAWS, baseado na troca de mensagens estruturadas no formato *JavaScript Object Notation* (JSON). A utilização deste formato se deve à legibilidade e compatibilidade com aplicações distribuídas, além de estar em conformidade com a especificação definida pela norma IETF RFC 7545. A troca de mensagens em JSON facilita a interoperabilidade entre diferentes sistemas e garante maior flexibilidade na manipulação e interpretação dos dados por parte do *software* de integração.

O procedimento é iniciado pela BS, que transmite uma mensagem de solicitação de inicialização ao servidor da base de dados. Esta mensagem inclui três categorias fundamentais de informações:

- i. **Descritor do dispositivo:** composto por identificadores exclusivos que caracterizam o equipamento, como modelo número de série, permitindo à base de dados reconhecer o tipo de dispositivo solicitante e validar seu perfil operacional;
- ii. **Geolocalização:** especificada por coordenadas de latitude e longitude obtidas via *Global Positioning System* (GPS), que indicam com precisão a posição física do equipamento (BS ou UE). Esta informação é essencial para que a base de dados determine quais canais estão disponíveis na área geográfica em questão, respeitando as zonas de proteção dos serviços licenciados;
- iii. **Características da antena:** incluem parâmetros como a altura da antena em relação ao solo e tipo de montagem (omnidirecional ou direcional). Esses dados são utilizados pela base de dados para calcular o potencial de interferência e aplicar as restrições técnicas de operação adequadas.

Após o recebimento da solicitação, a base de dados processa as informações e responde com uma mensagem que contém as regras operacionais que deverão ser seguidas pela BS e a confirmação da conclusão bem-sucedida da fase de inicialização, autorizando o prosseguimento do protocolo.

Concluída essa etapa, a estação rádio-base envia uma nova mensagem para a solicitação de disponibilidade espectral, que reapresenta o descritor do dispositivo, a localização e as características da antena. Com base nessas informações, a base de dados executa uma avaliação espectral do ambiente, determinando quais canais se encontram desocupados na localidade consultada.

Como resposta, é enviada uma mensagem que fornece um conjunto detalhado de canais autorizados para uso secundário, acompanhados das respectivas faixas de frequência, limites máximos de potência de transmissão, e demais restrições técnicas que asseguram a não interferência aos usuários primários.

Esse processo automatizado, intermediado pelo *software* “*Radio Interface*”, permite a configuração dinâmica e segura da rede de acesso, com seleção otimizada das faixas de operação em função da localização geográfica, promovendo eficiência espectral e conformidade regulatória.

No *software* “*Radio Interface*”, a aba *Identification* é responsável por inicializar os parâmetros essenciais exigidos no processo de comunicação entre os dispositivos da rede de acesso — incluindo a BS e as UEs — e a base de dados georreferenciada de TVWS. Essa etapa de configuração é fundamental para garantir que os dispositivos sejam corretamente reconhecidos e autorizados a operar na faixa de espectro correspondente à sua localização geográfica.

A Figura 5 apresenta a interface gráfica da aba *Identification*, que possibilita ao operador inserir os dados necessários para o envio das mensagens iniciais do protocolo PAWS, conforme definido na norma IETF RFC 7545 [10].

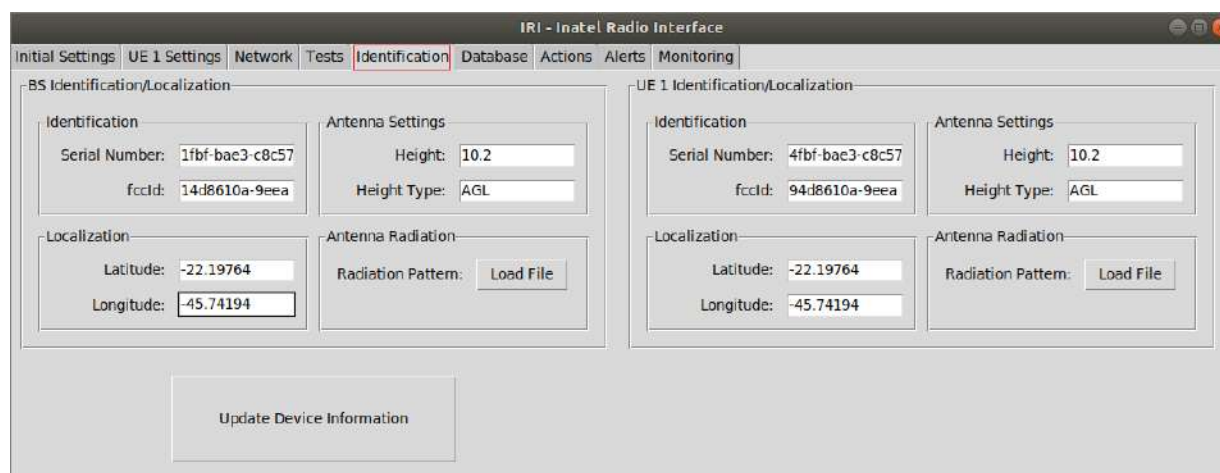


Figura 5: Aba da interface gráfica para inserção de parâmetros de inicialização da comunicação entre a rede de acesso do Projeto Brasil 6G e a base de dados TVWS.

Como ilustrado na figura, a aba contempla a configuração de parâmetros tanto para a BS quanto para os terminais UEs alocados na rede (neste exemplo, a UE 1), organizados em quatro grupos principais:

- i. *Identification*: engloba os campos *Serial Number* e *fccID*. O *Serial Number* é um identificador exclusivo atribuído ao dispositivo, utilizado para rastreabilidade e controle. Já o *fccID* refere-se ao código de certificação do equipamento;
- ii. *Localization*: compreende as coordenadas de latitude e longitude do dispositivo, obtidas geralmente por meio de sistemas de posicionamento como o GPS. Essas informações são cruciais para a consulta à base de dados de TVWS, pois a disponibilidade espectral depende diretamente da posição geográfica do transmissor;
- iii. *Antenna Settings*: inclui os campos *Height* e *Antenna Type*. O parâmetro *Height* refere-se à altura da antena a partir do solo, enquanto *Height Type* indica o tipo de referência para a altura, como o *Above Ground Level* (AGL). Ambos podem ser utilizados para a avaliação da área de cobertura e na estimativa de interferência com serviços primários;
- iv. *Antenna Radiation*: permite o *upload* de um arquivo contendo o padrão de radiação da antena, que descreve os valores de ganho ou atenuação em função do ângulo de radiação (por exemplo, em azimuth), caracterizando com precisão o comportamento da antena em diferentes direções. Tais informações podem ser utilizadas pela base de dados para determinar com maior fidelidade as condições operacionais e aplicar as restrições técnicas adequadas à emissão.

Ao inserir os valores necessários e pressionar o botão *Update Device Information*, conforme apresentado na Figura 5, os dados são estruturados e atualizados em variáveis pré-definidas para que possam ser posteriormente enviados em mensagens JSON via protocolo PAWS para a

base de dados. Essa etapa de identificação e caracterização dos dispositivos garante que a base de dados de TVWS processe corretamente as solicitações de espectro.

Uma vez que os dados referentes aos descritores dos dispositivos, a geolocalização e as características da antena tenham sido previamente configurados por meio da aba *Identification*, a aba *Database* do *software* “*Radio Interface*” torna-se responsável pela integração da BS com a base de dados georreferenciada de TVWS, bem como pela visualização dos resultados obtidos referentes aos canais disponíveis na localidade.

Utilizando o modo automático de avaliação espectral, o operador pode acionar o processo de integração por meio do botão *Update Frequency Parameters*, o qual inicia a comunicação com a base de dados conforme os procedimentos definidos pelo protocolo PAWS, utilizando mensagens estruturadas no formato JSON. Essas mensagens correspondem, respectivamente, à solicitação de inicialização e registro do dispositivo e à consulta de disponibilidade espectral, ambas baseadas nos parâmetros previamente inseridos.

Após o envio, o *software* “*Radio Interface*” processa as respostas recebidas — resposta de inicialização e registro, e resposta de avaliação espectral — e realiza o armazenamento e organização dos canais livres disponibilizados pela base de dados. Essas informações incluem atributos como largura de banda, frequências inicial e final, e limites máximos de potência de transmissão, todos compatíveis com as restrições regulatórias e o perfil do dispositivo solicitante.

Para auxiliar na escolha das faixas de operação mais adequadas, o *software* aplica um algoritmo de filtragem inteligente, cujo objetivo é identificar as duas melhores opções de canais disponíveis para operação em *uplink* e *downlink*. O critério de seleção considera, por exemplo:

- A eliminação de faixas de frequência incompatíveis com a resposta espectral dos duplexadores dos transceptores;
- A priorização de blocos de espectro contíguos, maximizando a eficiência da alocação e a robustez da comunicação.

Como resultado, o sistema retorna os valores ótimos de frequência para operação, que são automaticamente exibidos na interface gráfica, e calcula as frequências centrais correspondentes a cada faixa selecionada. Esses valores são então armazenados e associados aos parâmetros do transceptor, de modo que, ao se iniciar o *script* de execução do rádio, ele já esteja corretamente configurado para operar nas frequências previamente alocadas, reduzindo o tempo de inicialização e evitando falhas de sincronização.

Adicionalmente, a aba *Database* também disponibiliza um modo manual de configuração, permitindo ao usuário definir diretamente as frequências de operação para *uplink* e *downlink*. Essa funcionalidade é especialmente útil em cenários em que a base de dados esteja temporariamente indisponível, ou em situações controladas de testes e validação, como no caso de testes laboratoriais.

A Figura 6 apresenta a aba *Database* da interface gráfica do *software*, destacando os elementos visuais utilizados na configuração automática e manual das faixas de frequência da rede de acesso do Projeto Brasil 6G.

The screenshot displays the 'IRI - Intel Radio Interface' software window. The 'Database' tab is selected in the top menu. The interface is divided into three main sections for frequency parameter configuration:

- AUTO MODE: Frequency Parameters (Primary Option)**
 - Low Frequency (LF) Band Selection:** LF Channel: 27-30, LF Initial Frequency (Hz): 548000000, LF Final Frequency (Hz): 572000000, LF Bandwidth (Hz): 24000000, LF Power (dBm): 39.
 - High Frequency (HF) Band Selection:** HF Channel: 10-14, HF Initial Frequency (Hz): 250000000, HF Final Frequency (Hz): 274000000, HF Bandwidth (Hz): 24000000, HF Power (dBm): 39.
- AUTO MODE: Frequency Parameters (Information of Secondary Option)**
 - Low Frequency (LF) Band Selection:** LF Channel: 46-49, LF Initial Frequency (Hz): 662000000, LF Final Frequency (Hz): 686000000, LF Bandwidth (Hz): 24000000, LF Power (dBm): 39.
 - High Frequency (HF) Band Selection:** HF Channel: 10-14, HF Initial Frequency (Hz): 450000000, HF Final Frequency (Hz): 474000000, HF Bandwidth (Hz): 24000000, HF Power (dBm): 39.
- MANUAL MODE: Frequency Parameters**
 - Low Frequency (LF) Band Selection:** LF Channel: 21-21, LF Initial Frequency (Hz): 512000000, LF Final Frequency (Hz): 518000000, LF Bandwidth (Hz): 6000000, LF Power (dBm): 39.
 - High Frequency (HF) Band Selection:** HF Channel: 40-41, HF Initial Frequency (Hz): 626000000, HF Final Frequency (Hz): 638000000, HF Bandwidth (Hz): 12000000, HF Power (dBm): 39.

On the right side, the **Spectrum Sensing Mode** is set to **Automatic**. There is an option to **Enable Channel Filtering** (unchecked). Below this, there are input fields for **Tx Link Filtering** (From: , Up to:) and **Rx Link Filtering** (From: , Up to:). An **Update Frequency Parameters** button is located at the bottom right of the main configuration area.

Figura 6: Aba da interface gráfica para inicialização da comunicação com a base de dados de TVWS e visualização das faixas de frequência selecionadas para operação na rede de acesso.

3 Esquemas de redução de PAPR

Conforme mencionado, a implementação da rede de acesso em desenvolvimento pelo Inatel considera o uso da forma de onda GFDM, sobretudo, graças à sua baixa emissão fora de faixa ou *Out-of-Band Emission* (OOBE), que favorece o compartilhamento de espectro com outras tecnologias. O sistema inovador proposto considera também a faixa de UHF, caracterizando-o como uma solução de TVWS. Contudo, o GFDM, assim como o OFDM e algumas formas de onda multiplexadoras, possuem uma PAPR elevada, favorecendo distorções no sinal transmitido quando os picos de potência se aproximam ou ultrapassam a região de saturação dos amplificadores de potência de RF.

No caso dos sistemas de TVWS no Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) determina que a potência de pico transmitida não ultrapasse 1 W [6]. Assim, respeitado esse limite, quanto menor for a PAPR, maior será a potência média efetivamente transmitida, permitindo ampliar a área de cobertura, aprimorar a qualidade do enlace e suportar maiores taxas de transmissão de dados. Em virtude do limite estrito de potência de pico em sistemas de TVWS, otimizar a PAPR é essencial e, em cenários críticos, pode ser o fator determinante para viabilizar o uso dessa tecnologia.

Na literatura são apresentadas diversas técnicas de redução da PAPR, tais como pré-codificação por *Discrete Cosine Transform* (DCT) e *Discrete Sine Transform* (DST) [11], pré-codificação por *Discrete Fourier Transform* (DFT) [12], pré-codificação baseada em sequências Zadoff–Chu [13], esquemas de *Partial Transmission Sequence* (PTS) e *Selective Mapping* (SLM) [14–16] e técnicas de *clipping* e *companding* [17–19]. Dentre as diferentes técnicas identificadas, selecionou-se a pré-codificação utilizando DFT para implementação e avaliação, em razão de sua complexidade computacional reduzida em comparação a outros métodos, o que facilita sua adoção em diferentes soluções.

A forma matricial do cálculo da DFT é amplamente utilizada por apresentar menor complexidade computacional em comparação às demais abordagens de cálculo. Dessa forma, a DFT é obtida com a multiplicação da matriz de *Fourier* pelo vetor de dados a ser transmitido [20], ou seja,

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{x}, \quad (1)$$

sendo $\mathbf{X}$ a transformada de *Fourier* do vetor de dados $\mathbf{x}$ e $\mathbf{W}$ sendo a matriz de *Fourier* com N pontos, dada por

$$\mathbf{W} = \left(\frac{\omega^{jk}}{\sqrt{N}} \right)_{j,k=0,\dots,N-1}, \quad (2)$$

em que $\omega = \exp\left(-\frac{2\pi i}{N}\right)$, j e k representa o número da linha e coluna respectivamente de cada elemento da matriz $\mathbf{W}$. A representação matricial definida em (2) é dada por

$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 & \dots & \omega^{N-1} \\ 1 & \omega^2 & \omega^4 & \dots & \omega^{2(N-1)} \\ 1 & \omega^3 & \omega^6 & \dots & \omega^{3(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{N-1} & \omega^{2(N-1)} & \dots & \omega^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Assim, analisando as equações (1) e (2), conclui-se que o cálculo da DFT causa o espalhamento das informações de entrada em todas as subportadoras. Em outras palavras, cada subportadora X_k deixa de depender de um único símbolo de entrada e passa a ser obtida como uma

soma ponderada de todos os símbolos x_n de entrada pelos coeficientes $\omega^{kn} = \exp(-2\pi i kn/N)$, distribuindo a energia dos símbolos por todo o espectro de subportadoras. Matematicamente, exprimem-se os efeitos da DFT em uma subportadora X_k como

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left(-\frac{2\pi jkn}{N}\right). \quad (4)$$

Ademais, em (4), evidencia-se que a DFT modifica o espaço de sinais transmitidos em cada subportadora. A Figura 7 mostra os símbolos de uma constelação 16-*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) convencional comparada com a mesma constelação obtida após a aplicação da DFT.

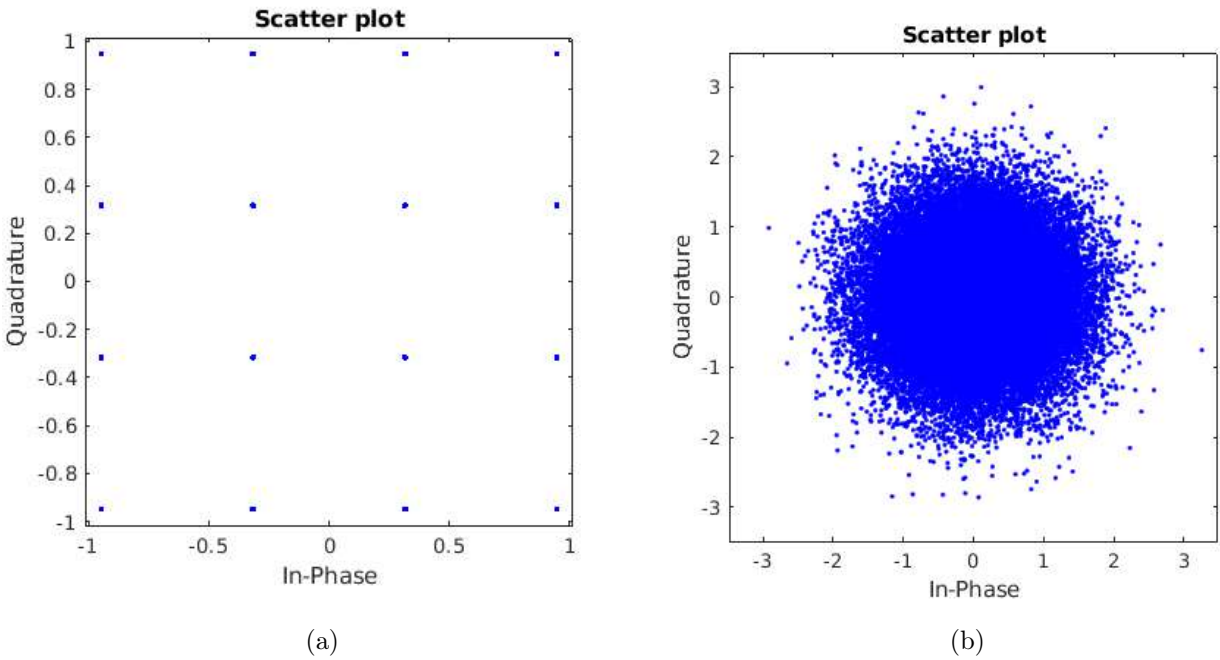


Figura 7: Símbolos 16QAM : (a) símbolos 16QAM sem DFT e (b) símbolos 16QAM com DFT.

3.1 Implementação da técnica de pré-codificação para redução de PAPR no Transceptor Brasil 6G

Com o objetivo de viabilizar a avaliação da técnica de redução de PAPR selecionada de forma integrada ao transceptor Brasil 6G, foi necessário implementar os blocos de processamento do algoritmo no mesmo *framework* utilizado pelo transceptor. Vale destacar que o transceptor Brasil 6G é implementado utilizando o *framework* GNU Radio [21], que é uma ferramenta *open-source* de desenvolvimento de soluções de radiocomunicação e rádio definido por *software*. Esse *framework* permite que novos blocos de processamento implementados em linguagem C++ ou Python possam ser criados e utilizados na solução.

Conforme mencionado, o transceptor Brasil 6G utiliza o GFDM como forma de onda. Cada símbolo GFDM é formado por $N = KM$ símbolos QAM, sendo K o número total de subportadoras disponíveis e M o número de subsímbolos transmitidos por cada subportadora. A estrutura de quadro considerada para a avaliação da técnica de pré-codificação é idêntica à da

numerologia 0 do transceptor Brasil 6G, que considera $K = 16384$ subportadoras e $M = 4$ subsímbolos por subportadora. Nesse caso, cada subportadora transmite, portanto, 4 subsímbolos identificados como m_0 , m_1 , m_2 e m_3 . No entanto, nem todas as subportadoras estão ativas. Com isso, designa-se como K_{ON} o número de subportadoras ativas, ou seja, que transportam alguma informação, e K_{OFF} o número de subportadoras inativas, isto é, que não transmitem informação alguma. As subportadoras K_{ON} podem ser utilizadas para a transmissão de três tipos de dados: pilotos, controle e informações úteis ou dados do usuário. Para este algoritmo, a partir daqui, K_{DU} serão as subportadoras que transportam informações úteis ou dados do usuário.

Para implementar a pré-codificação via DFT no transceptor Brasil 6G, foram definidas duas etapas essenciais: a aplicação da DFT na cadeia de transmissão e da *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT) na cadeia de recepção, conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

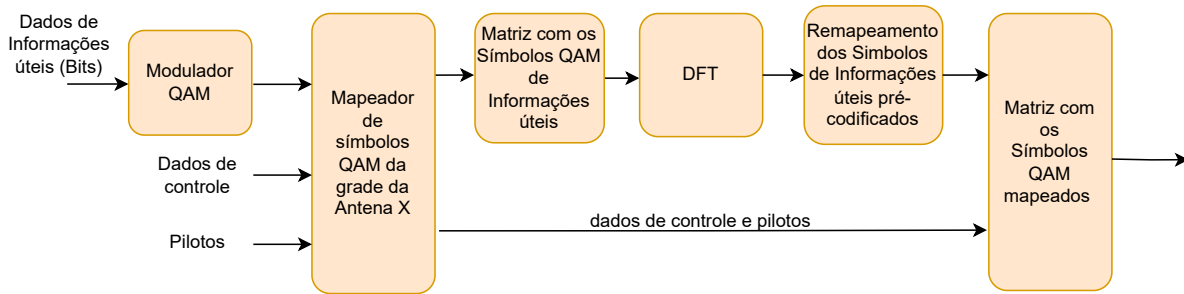


Figura 8: Implementação da DFT na transmissão de dados do Transceptor Brasil 6G.

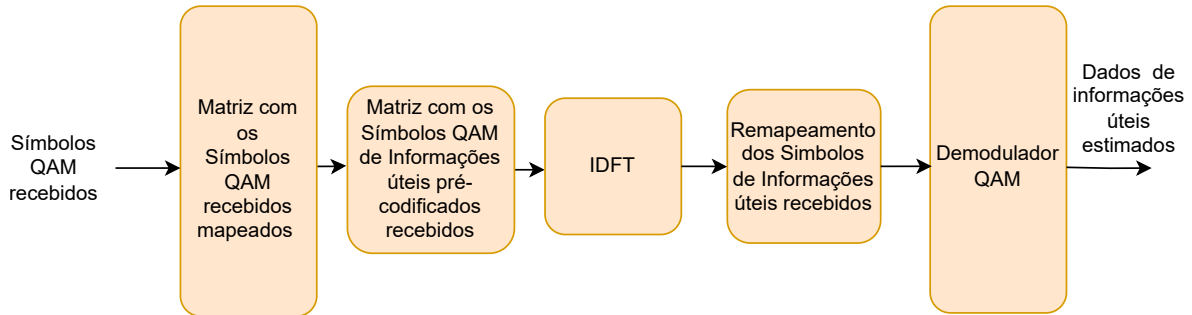


Figura 9: Implementação da IDFT na recepção de dados do Transceptor Brasil 6G.

Na etapa de transmissão dos dados, indicada pela Figura 8, o modulador QAM associa os conjuntos de bits de usuário aos respectivos símbolos modulados (subsímbolos), conforme a ordem de modulação selecionada. Um mapeador de símbolos QAM é responsável por organizar as informações fornecidas pelo modulador em uma grade ou matriz. Este mapeador posiciona os dados de transmissão, pilotos, controle e dados de informação do usuário, em posições específicas, definidas pela estrutura do quadro de transmissão. Como se considera a utilização de MIMO 2×2 , o mapeador produz duas matrizes de transmissão, sendo uma para cada antena.

Na etapa de recepção dos dados, ilustrada na Figura 9, os símbolos QAM recebidos são organizados em duas matrizes, uma para cada antena de recepção. Em cada matriz de recepção, os símbolos QAM que transportam informação útil são extraídos e alocados em um bloco específico, denominado matriz de decodificação. Aplica-se, então, a IDFT nos dados pertencentes

à essa matriz. Em seguida, faz-se a reinserção ou remapeamento dos dados úteis decodificados nas posições originais que eles ocupavam na matriz de recepção. Finalmente, esses resultados são enviados a um demodulador QAM para a devida estimação dos dados de informações úteis.

Os resultados referentes à implementação da técnica de pré-codificação via DFT visando a redução da PAPR foram obtidos de duas formas: por meio de uma simulação computacional; e por meio de uma implementação no ambiente do GNU Radio. A primeira forma foi utilizada preliminarmente apenas para validação dos benefícios da técnica em um sistema que desconsidera inserção de pilotos e dados de controle. A segunda considerou essas informações e diferentes configurações para avaliar a robustez da técnica diante de um cenário mais realista, apenas dentro do próprio GNU Radio, sem levar em conta aspectos físicos de uma transmissão de RF. Ambas as formas e suas derivações serão abordadas a seguir.

3.1.1 Resultados de Simulação Computacional

Para a avaliação teórica preliminar da técnica proposta, realizou-se, portanto, uma simulação computacional em MATLAB[®]. Nessa simulação, o cálculo da DFT foi realizado em grupos de dados contendo, cada um, subsímbolos com mesmo índice. Especificamente, cada um dos M grupos de dados contém K subportadoras com mesmo índice do subsímbolo: o primeiro grupo de dados contém K subportadoras no subsímbolo m_0 , o segundo grupo de dados contém K subportadoras no subsímbolos m_1 , o terceiro grupo de dados contém K subportadoras no subsímbolos m_2 e o quarto grupo de dados contém K subportadoras no subsímbolos m_3 . Portanto, são calculadas 4 DFTs de dimensão K . A Figura 10 apresenta o resultado dessa simulação, com as curvas da PAPR com pré-codificação DFT e da PAPR sem pré-codificação DFT. É possível observar que, neste caso, o ganho de redução de PAPR foi de aproximadamente 2,5 dB em uma *Complementary Cumulative Distribution Function* (CCDF) de 10^{-4} . O ganho obtido equivale diretamente ao valor do aumento da potência média de transmissão do sistema, para uma mesma potência de pico.

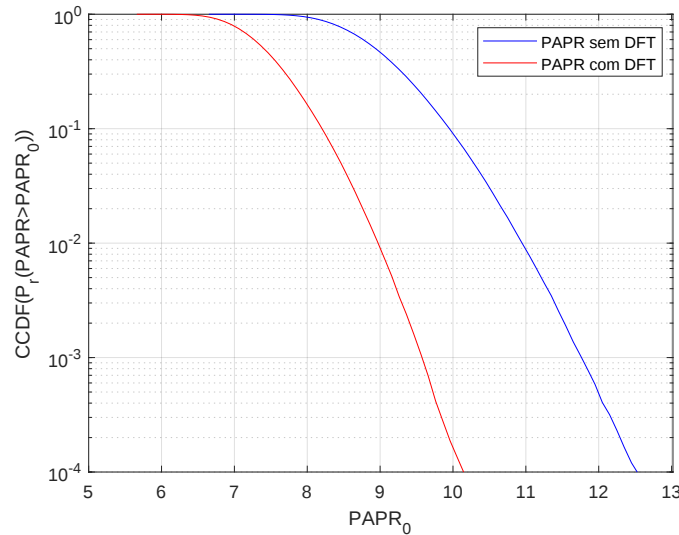


Figura 10: Avaliação teórica da pré-codificação por DFT: curva da PAPR simulada no MATLAB[®].

Conforme mencionado, para a condição inicial de avaliação da técnica em ambiente de simulação, não foi considerada a inserção de informações de controle e pilotos dentre os dados

a serem processados. Isso viabiliza o cálculo da DFT com comprimento de dados máximo, ou seja, K , o que proporciona um melhor desempenho da técnica com relação à redução da PAPR. Porém, no caso da implementação prática no transceptor Brasil 6G, há a necessidade de transmissão de informações especiais, além das informações úteis, que são as pilotos inseridas para estimação do canal e os dados de controle para configuração do enlace e do sistema de recepção. Assim, as subportadoras de dados que transportam informações do usuário são reduzidas a K_{DU} (sendo $K_{DU} < K_{ON} < K$). Como as informações especiais devem ser demoduladas pelo receptor antes da realização do cálculo da IDFT, faz-se necessário preservar tais informações durante o processo de pré-codificação, conforme descrito anteriormente. Desse modo, as informações de controle e pilotos não passam pelo processo de pré-codificação DFT, resultando na perda de desempenho da técnica quando comparada com os resultados obtidos na simulação computacional conforme será evidenciado nos resultados mostrados a seguir.

3.1.2 Resultados no GNU Radio

Após a avaliação da técnica por meio de simulações computacionais em MATLAB®, os algoritmos de processamento foram implementados em linguagem C++ e integrados ao transceptor Brasil 6G. Essa integração foi realizada utilizando o *framework* GNU Radio, permitindo a conexão eficiente com os demais blocos funcionais do sistema. A partir disso, visando identificar a melhor configuração para aplicação da pré-codificação, levando em conta as informações especiais transmitidas pelo transceptor, foram conduzidos testes com a DFT contendo diferentes dimensões e quantidades variadas de pilotos, conforme descrito a seguir.

Uma primeira configuração utilizada para avaliação do impacto da dimensão da DFT foi considerando a inserção de 1 subportadora piloto a cada 3 subportadoras de dados do usuário e a inserção de 32 subportadoras de controle a cada conjunto de 1056 subportadoras. Vale destacar que esses parâmetros também são idênticos àqueles associados à numerologia 0 utilizada no transceptor Brasil 6G. A implementação da DFT para esta configuração foi avaliada de diferentes formas. Uma delas considera o cálculo da DFT para cada grupo de 3 subportadoras que transmitem dados do usuário, que é o número de subportadoras de dados contíguas entre duas subportadoras pilotos. O resultado com relação à redução da PAPR está demonstrado na Figura 11. Neste caso, a curva em vermelho representa a curva de PAPR para GFDM com pré-correção DFT e a curva em azul para GFDM convencional, ou seja, sem pré-codificação. O resultado apresentado mostra uma redução de, aproximadamente, 0,3 dB em uma CCDF de 10^{-4} , com as seguintes configurações: número total de subportadoras $K = 16384$, número total de subsímbolos por subportadora $M = 4$, número total de subportadoras com pilotos igual a 3168 e 1 subportadora com piloto a cada 3 subportadoras com dados de informações do usuário.

Uma outra configuração utilizada para avaliação do impacto da dimensão da DFT foi considerando uma dimensão igual ao número total de subportadoras que transmitem informações de dados de usuário, K_{DU} , desconsiderando todas as informações especiais, sendo necessário calcular 4 DFTs com esta dimensão. Cada uma delas foi calculada sobre um grupo de subsímbolos: m_0 , m_1 , m_2 e m_3 . O resultado obtido com relação à aplicação da técnica de pré-codificação para esta configuração está apresentado na Figura 12. Neste caso, a redução da PAPR foi de, aproximadamente, 0,8 dB em uma CCDF de 10^{-4} . O resultado obtido, comparado com a primeira forma de implementação apresentada, evidencia que, quanto maior a dimensão da DFT, maior a redução da PAPR alcançada com a aplicação da técnica de pré-codificação.

Visando avaliar o impacto do espaçamento das subportadoras pilotos na redução da PAPR, foram testados diferentes espaçamentos, não apenas 4, mas, também 8, 16 e 32 subportadoras.

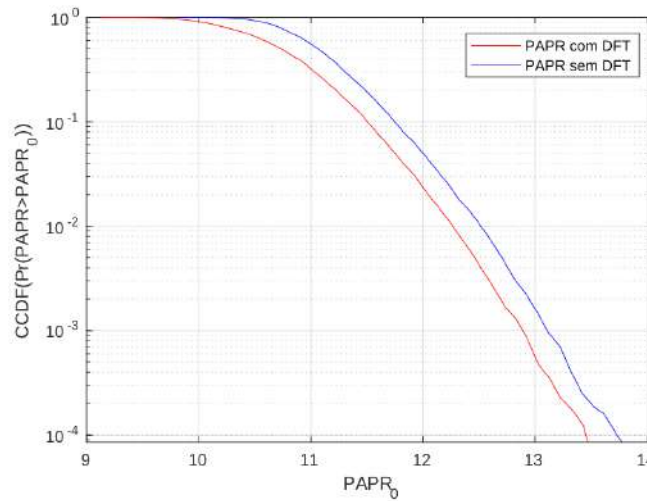


Figura 11: Curva da PAPR do transceptor com DFT com dimensão igual a 3.

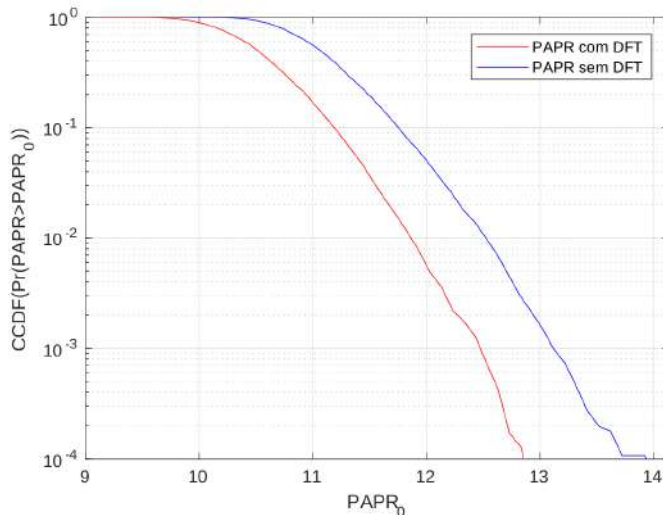


Figura 12: Curva da PAPR do transceptor com DFT com dimensão igual ao número de subportadoras úteis ou de dados do usuário.

Nessas avaliações, pode-se observar que a configuração que proporcionou maior redução da PAPR foi com o espaçamento de pilotos a cada 32 subportadoras. A Figura 13 apresenta a curva de PAPR do transceptor com e sem pré-codificação DFT, com ambas aliadas à configuração de uma piloto a cada 32 subportadoras de dados. As demais configurações relacionadas ao total de subportadoras, assim como a inserção de subportadoras de controle, permanecem idênticas às aquelas utilizadas nos testes anteriores. Aqui, obteve-se uma redução de, aproximadamente, 0,85 dB da PAPR para uma CCDF de 10^{-4} . Vale lembrar que, no caso teórico, houve uma redução de aproximadamente 2,5 dB, como se vê na Figura 10. Essa perda de desempenho ocorre porque, no caso prático, as informações de piloto e controle não passaram pelo processo de pré-codificação, ou seja, os picos ocorridos nestes elementos não são suprimidos com o efeito do espalhamento da informação gerado pela aplicação da DFT.

A partir dos resultados alcançados, pode-se identificar que a redução da PAPR é potencializada com o aumento da dimensão da DFT e também com o aumento do espaçamento de inserção das subportadoras pilotos.

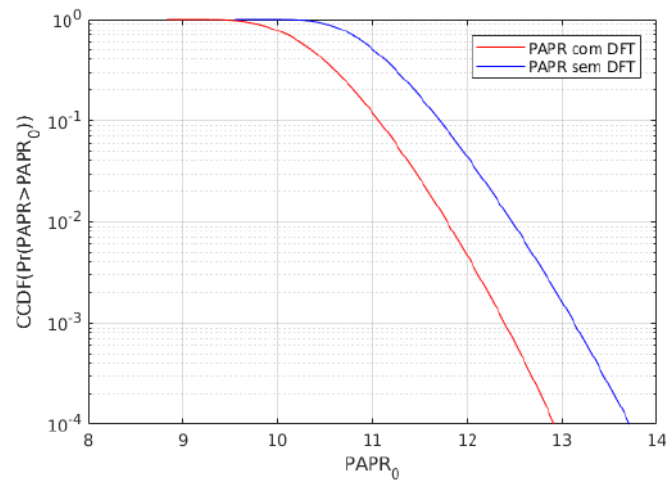


Figura 13: Curva da PAPR do transceptor com e sem pré-codificação DFT para espaçamento de 32 subportadoras entre pilotos.

Adicionalmente, alguns blocos de processamento auxiliares também foram desenvolvidos e integrados aos algoritmos do transceptor ao longo da realização dos testes, destacando-se o bloco de medida de PAPR do sinal GFDM a ser transmitido pelo transceptor.

Os testes e avaliações iniciais da técnica integrada aos demais algoritmos do transceptor, citados no presente documento, foram realizados utilizando-se um projeto no qual o sistema de transmissão e recepção estão integrados dentro do próprio GNU Radio, não havendo influência do processo de conversão analógico-digital, e vice-versa, conversão para RF e incidência de ruídos e sinais externos. Estes devem ser considerados em avaliações posteriores e complementares da técnica.

4 Pesquisa e Implementação de Metassuperfícies

As metasuperfícies têm emergido rapidamente como uma tecnologia revolucionária, com aplicações de grande impacto em diversas áreas, como proteção contra radiação eletromagnética, furtividade em sistemas de radar e comunicações sem fio. Esses materiais artificiais, formados por arranjos bidimensionais de dispersores com dimensões menores que o comprimento de onda —conhecidos como meta-átomos—, destacam-se por sua espessura ultrafina, facilidade de integração e notável capacidade de manipular ondas eletromagnéticas. Projetadas e ajustadas com precisão para exibirem propriedades eletromagnéticas únicas e não convencionais, constituem uma plataforma versátil e promissora para o controle de ondas em múltiplas faixas do espectro [22–26]. No contexto das redes de comunicações móveis, essas estruturas se destacam por sua habilidade de controlar parâmetros fundamentais das ondas, como fase, amplitude, polarização e direção de propagação, viabilizando sistemas mais eficientes, dinâmicos e responsivos ao ambiente. Um exemplo notável são as superfícies inteligentes reconfiguráveis, ou *Reconfigurable Intelligent Surface* (RIS), que introduzem uma abordagem inovadora para o controle ativo do canal de propagação, permitindo sua modelagem em tempo real entre transmissores e receptores [27–31]. Essa funcionalidade é particularmente relevante para as redes 6G, que exigirão alta densidade de conexões, elevada confiabilidade e ampla cobertura em ambientes desafiadores, como cidades inteligentes e fábricas conectadas [32, 33]. Ao transformar superfícies passivas do ambiente, como paredes e fachadas, em elementos capazes de refletir ou redirecionar sinais de forma controlada, as metasuperfícies reconfiguráveis têm o potencial de redefinir o paradigma das comunicações sem fio, contribuindo para maior eficiência espectral, menor consumo de energia e maior adaptabilidade das redes. No entanto, sua aplicação enfrenta desafios práticos, especialmente quando instaladas em superfícies não planas, o que pode comprometer o desempenho e dificultar a implementação. Para contornar essas limitações, torna-se essencial o desenvolvimento de metasuperfícies flexíveis ou conformáveis, capazes de se adaptar às geometrias irregulares das superfícies de suporte. Nesse sentido, um dos objetivos deste trabalho é investigar o uso de materiais avançados, como o MXene, entre outros, na concepção de estruturas flexíveis, conforme detalhado ao longo deste capítulo.

Este capítulo apresenta uma introdução aos princípios físicos que regem o funcionamento das metasuperfícies, detalha o método numérico utilizado nas simulações eletromagnéticas e descreve o processo de prototipagem dos dispositivos desenvolvidos, bem como o arranjo experimental empregado nas medições. Por fim, são discutidos os resultados obtidos, com uma análise comparativa entre simulações e experimentos, destacando-se as principais contribuições, limitações observadas e possíveis aplicações.

4.1 Princípios

As metasuperfícies são estruturas caracterizadas por um arranjo periódico planar de células unitárias com dimensões inferiores ao comprimento de onda de operação. Essas células unitárias são projetadas para conferir propriedades eletromagnéticas únicas [34], por meio do controle preciso sobre os componentes dos campos elétrico e magnético das ondas eletromagnéticas [35]. Esse controle é viabilizado pelas características ressonantes das células unitárias, que permitem um forte acoplamento das ondas incidentes com a estrutura. Tradicionalmente, as metasuperfícies são fabricadas sobre substratos rígidos, como placas de fibra de vidro (FR-4 ou RO4000C, da fabricante Rogers®) ou laminados de cobre. No entanto, o uso desses materiais impõe limitações práticas, especialmente quando se busca a integração das metasuperfícies em

superfícies curvas ou não planares. Nesse contexto, o emprego de substratos flexíveis e a aplicação de materiais condutores na forma de tinta emergem como alternativas inovadoras para a implementação de metasuperfícies flexíveis. Além de possibilitar maior versatilidade de aplicação, esses substratos permitem a modulação ativa das propriedades eletromagnéticas por meio de deformações mecânicas, como dobras e torções, viabilizando o desenvolvimento de dispositivos reconfiguráveis e adaptáveis. Complementarmente, a deposição de materiais condutores sobre substratos flexíveis, frequentemente realizada com tintas condutivas, tem se mostrado uma abordagem promissora. Essa técnica permite a formação de filmes ultrafinos com elevada condutividade elétrica, cujas espessuras são significativamente menores que o comprimento de onda de operação. Essa característica favorece aplicações em dispositivos eletrônicos leves, flexíveis e de alto desempenho.

4.2 Metodologia

Nesta seção, abordamos o desenvolvimento de metassuperfícies flexíveis baseadas em substratos de celulose, obtidas por meio da deposição de uma solução condutiva sintetizada a partir de MXene. Os MXenes representam uma classe emergente de compostos inorgânicos bidimensionais, compostos por camadas ultrafinas de carbonetos, nitretos ou carbonitretos de metais de transição [36]. Essa nova classe de materiais apresenta um potencial notável para aplicações em comunicações de curto alcance, especialmente em dispositivos vestíveis, IoT e *Wireless Energy Transfer* (WET). O desenvolvimento dessas metassuperfícies flexíveis envolve, inicialmente, a otimização geométrica das células unitárias por meio de simulações eletromagnéticas. Em seguida, procede-se à fabricação e à caracterização experimental dos protótipos, com vistas à validação de seu desempenho eletromagnético em condições reais de operação.

4.2.1 Simulações de Metassuperfícies Flexíveis

As simulações eletromagnéticas de onda completa foram conduzidas usando o *software* COMSOL Multiphysics[®], ferramenta que explora o Método dos Elementos Finitos, *Finite Element Method* (FEM), para calcular as Equações de Maxwell na forma diferencial. O FEM é uma técnica numérica que aproxima soluções de equações diferenciais em situações reais. É amplamente utilizado em áreas como estruturas mecânicas, transferência de calor, óptica aplicada e eletromagnetismo. O método subdivide o domínio do problema em pequenos elementos interligados por pontos nodais, onde a solução é interpolada, respeitando as condições de contorno. O problema é então transformado em um sistema de equações algébricas [37].

A Figura 14 apresenta a interface do ambiente de simulação do software COMSOL Multiphysics[®], amplamente utilizado para resolver problemas físicos abordados. A imagem mostra a configuração de um estudo eletromagnético no domínio da frequência, utilizando a interface *Electromagnetic Waves, Frequency Domain*. À esquerda, o painel *Model Builder* exibe a estrutura do modelo, incluindo definições globais, parâmetros, materiais, geometria, física aplicada, condições de contorno (portas, condições periódicas e condições de transição), e a malha gerada. A etapa de estudo *Study 1* está configurada para uma varredura de frequência compreendida entre $1 \text{ GHz} \leq f \leq 12 \text{ GHz}$, com passos de 20 MHz, conforme definido no painel *Settings* ao centro da figura. À direita, o painel gráfico exibe a geometria tridimensional do modelo com a malha aplicada, evidenciando uma estrutura simétrica com camadas condutoras e uma região central de interesse mais refinada. Essa visualização permite verificar a discretização espacial e a integridade do modelo antes da simulação. Após o ajuste completo das definições, executa-se

a simulação, visualiza os resultados e realiza análises como os coeficientes de reflexão e transmissão, distribuição dos campos elétricos e magnéticos, entre outros parâmetros relevantes.

O método se beneficia das condições periódicas impostas pela metassuperfície e conduz a modelagem de maneira mais eficiente. Como visto na Figura 15 (a), a simulação considerou apenas uma única célula unitária, diminuindo significativamente o volume do espaço para os cálculos numéricos e, conseqüentemente, diminuindo o tempo e o esforço computacional na resolução do problema. Portanto, na ferramenta de simulação foi desenhado apenas uma célula unitária e nela aplicadas as condições periódicas de Floquet nos contornos laterais, quanto nas faces perpendiculares ao eixo x tanto perpendiculares no eixo y . As bordas superior e inferiores são condicionadas com *Perfectly Matched Layers* (PMLs), que constitui de propriedades absorvedores que eliminam reflexões indesejadas nos limites do desenho. O MXene depositado sobre o papel possui condutividade com valor aproximado de $\sigma_{\text{MXene}} = 9 \times 10^3 \text{ S/m}$, enquanto que o papel considerado tem permissividade em torno de $\varepsilon_{\text{sub}} = 1.5$. Os parâmetros geométricos descritos na Figura 15(b) foram variados para encontrar a ressonância da metassuperfície na faixa de micro-ondas. Portanto, após inúmeras iterações entre diversas varreduras geométricas, encontrou-se a geometria otimizada, com os parâmetros utilizados como periodicidade $p_x = p_y = 16 \text{ mm}$, comprimentos das cruzes centrais $a = 15 \text{ mm}$, largura $b = 7 \text{ mm}$ e espessura $t = 2 \text{ mm}$.

Os parâmetros de espalhamento S foram utilizados na obtenção da resposta espectral das metassuperfícies. Em particular o parâmetro de transmissão S_{21} (dB) demonstra os efeitos de seletividade em frequência do modelo. Os resultados foram obtidos dentro da faixa $1 \text{ GHz} < f < 12 \text{ GHz}$ sob incidência normal de ondas *Linearmente Polarizadas* (LPs). Os resultados obtidos garantem que a geometria desenvolvida pode ser finalmente prototipada, para verificar os mesmos resultados nas condições reais de operação.

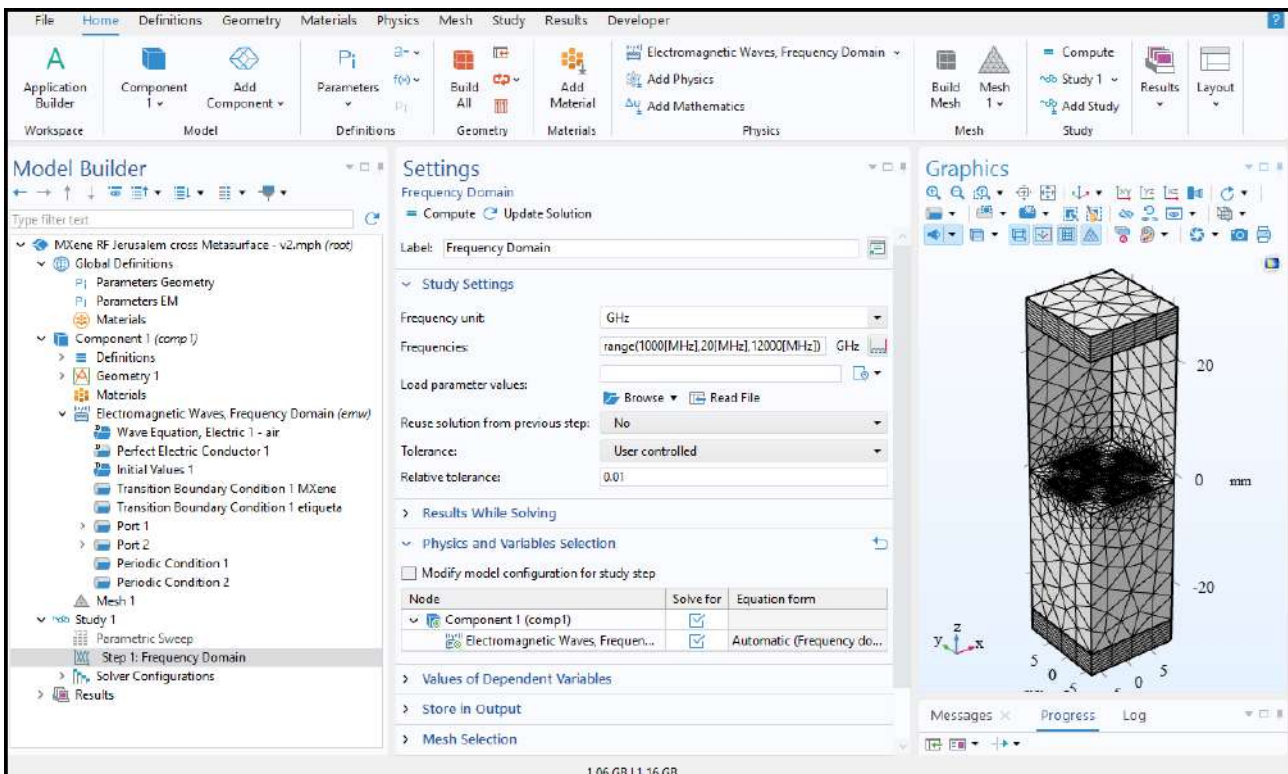


Figura 14: Interface do Comsol Multiphysics®.

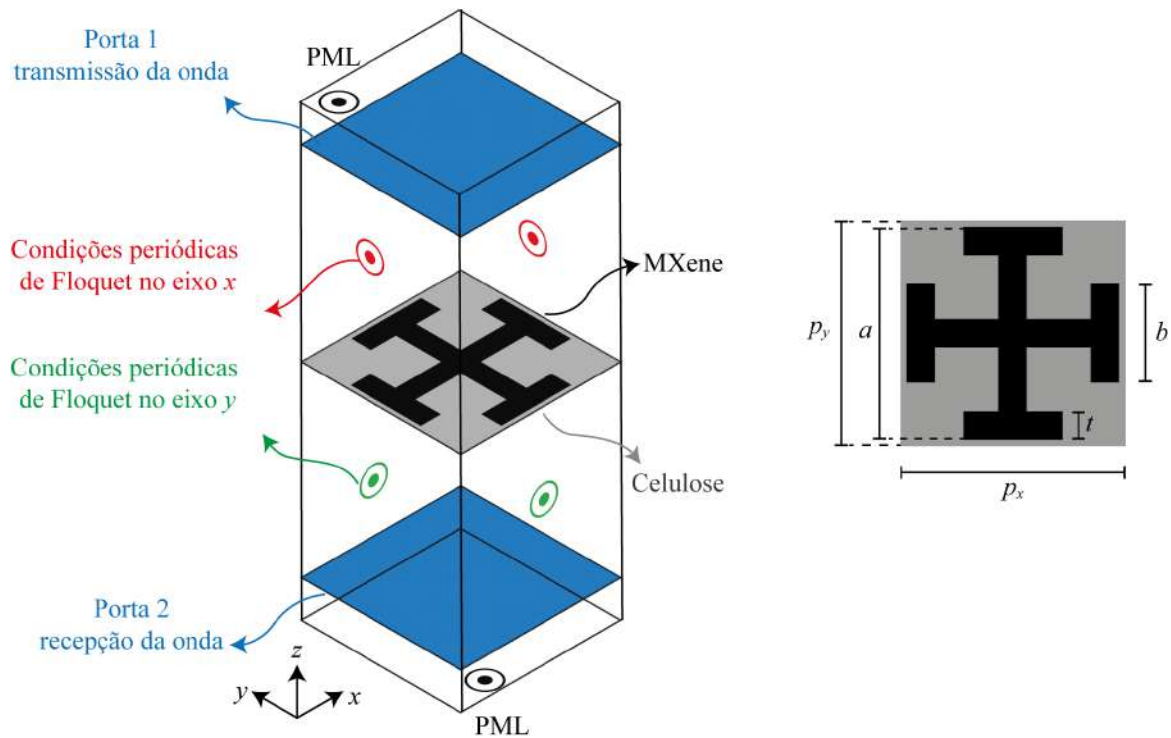


Figura 15: (a) Esquemático do algoritmo de simulação de uma célula unitária com PMLs nos domínios superior e inferior, condições de periodicidade nas laterais, portas para transmissão e recepção da onda eletromagnética e os materiais utilizados. (b) Parâmetros geométricos da célula unitária.

4.2.2 Prototipagem

A confecção das metassuperfícies se inicia pela escolha do substrato de celulose. Escolheu-se um papel etiqueta que é composto por uma camada de papel colante (adesivo) sobre outro papel (substrato). O processo de prototipagem iniciou-se com a utilização de uma impressora

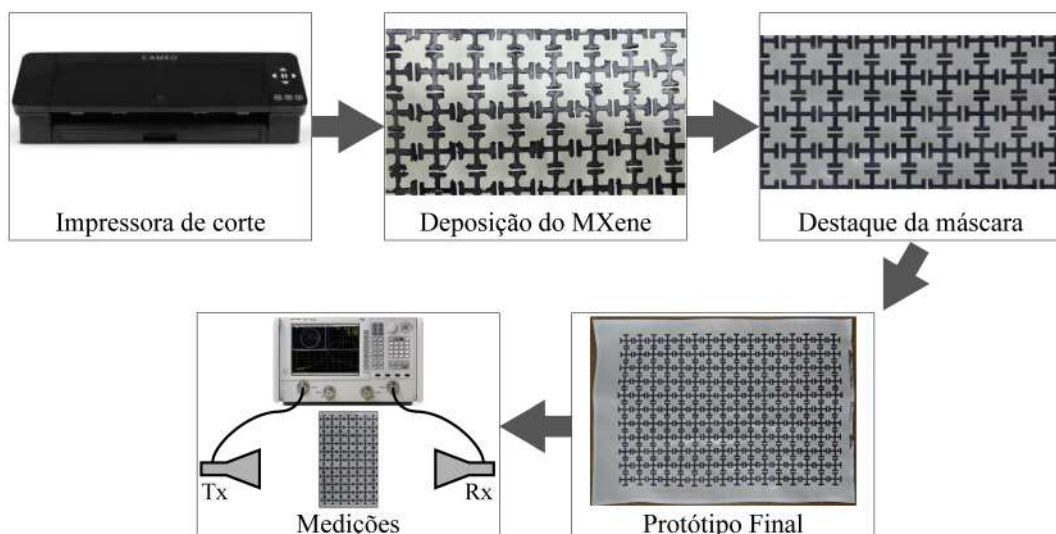


Figura 16: Sequência da prototipagem da metassuperfície.

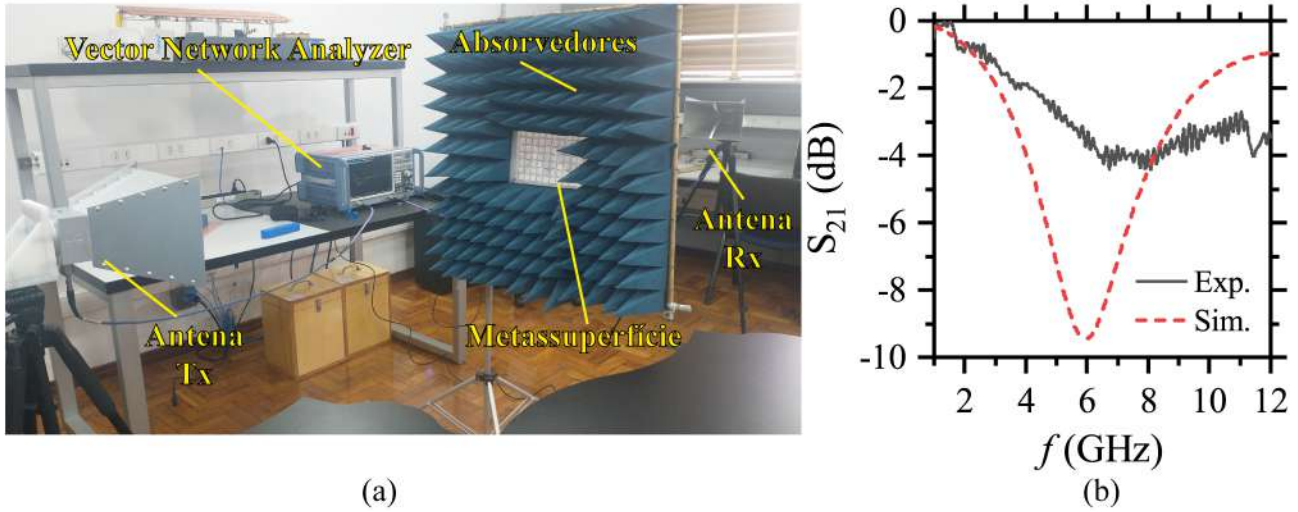


Figura 17: (a) Arranjo experimental para a medição do coeficiente de transmissão da metassuperfície. (b) Comparação dos resultados da simulação com os do experimento.

de corte, como mostra a Figura 16. A ideia é realizar cortes no papel adesivo nos padrões dos elementos condutores. Após ajustar a profundidade do corte e verificar a precisão da impressora, o papel etiqueta é por fim cortado nos padrões da cruz de Jerusalém, conforme as dimensões otimizadas na etapa de simulação. Assim, é possível fazer a deposição do MXene, por meio de um conta-gotas. Após um tempo, a solução absorvida pelo papel adesivo é curado e forma um filma fino no protótipo. Pode-se observar que nessa etapa o MXene apresenta borrões e outras imperfeições, mas a vantagem da abordagem escolhida é que podemos destacar o papel adesivo que envolve as células unitárias. Esse papel atua como uma máscara de deposição e, assim que removido, mantém o padrão retilíneo da cruz no protótipo, como visto na terceira imagem. Assim, temos a metassuperfície pronta e finalizada para a realização das medições.

4.2.3 Medições de Metassuperfícies Flexíveis

A Figura 17(a) mostra o arranjo experimental para as medições do coeficiente de transmissão S_{21} . As medições foram realizadas em ambiente laboratorial a fim de emular parâmetros de cenários reais. Para isso, utilizou-se de um analisador de rede vetorial, *Vector Network Analyzer* (VNA). Esse dispositivo é capaz de transmitir e receber sinais de radiofrequência através de antenas conectadas à ele. Trata-se do VNA da Rohde & Schwarz, modelo R&S®ZNB20, que gera sinais de rádio até $f = 20$ GHz. Duas antenas cornetas idênticas operam com ganho plano na faixa de $1 \text{ GHz} \leq f \leq 18 \text{ GHz}$ são alinhadas uma de frente à outra. A distância entre as antenas é suficiente para que ambas possam operar em campo distante. Entre elas é disposta uma estrutura absorvedora que, no centro, contém o protótipo atado à ela. Isso auxilia a antena receptora apenas receba sinais emitidos pela antena transmissora que propagam através da metassuperfície, mitigando sinais espúrios de reflexões indesejadas no ambiente.

4.3 Resultados

Os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão são ilustrados na Figura 17(b). Em particular, podemos observar o comportamento de filtro rejeita-faixa da metassuperfície no resultado simulado (veja a curva vermelha tracejada). Tem-se um ponto de

ressonância evidente próximo a $f = 6$ GHz, com um valor aproximado de $S_{21} = -9.5$ dB. Isso significa que quase 90% da onda que incide na metassuperfície está sendo refletida. No entanto, vale ressaltar que o resultado medido não apresenta a mesma curva característica de maneira evidente. Observa-se que o coeficiente de transmissão medido (curva preta sólida) também tem o comportamento de filtro rejeita-faixa, porém com menor intensidade, em torno de $S_{21} = -4.2$ dB na mesma frequência. Apesar dos resultados simulados e experimentais serem quantitativamente discordantes, nota-se que há uma boa concordância qualitativa, visto que o simulador predisse a resposta espectral na mesma faixa de micro-ondas.

Vale ressaltar que o simulador considerou a condutividade do MXene como $\sigma_{\text{MXene}} = 9 \times 10^3$ S/m. Esse valor foi obtido através de várias medidas de resistividade da película formada sobre o papel. Esse valor é bastante variável, devido a diferenças na síntese do material. Especificamente, esse protótipo pode ter o MXene depositado com um valor menor de σ_{MXene} , que acarreta na diminuição da força da ressonância. Esse ponto pode ser contornado utilizando de MXene com melhor condutividade, a fim de realizar melhores acoplamentos da onda incidente na metassuperfície.

Pode-se concluir que as metassuperfícies flexíveis possibilitam aplicações inovadoras ao serem integradas a superfícies curvas ou deformáveis. Na eletrônica vestível e em rede de área corporal, *Body Area Network* (BAN) [38, 39], podem ser incorporadas a tecidos para direcionamento de sinais RF e sensoriamento fisiológico, além de possibilitar terapias eletromagnéticas e diagnósticos por imagem [40]. Em ambientes inteligentes e aplicações de IoT, essas estruturas adaptam-se a superfícies irregulares, atuando como superfícies reconfiguráveis ou sensores inteligentes [41]. Veículos autônomos, drones e satélites de pequeno porte se beneficiam de sua leveza e conformabilidade [42]. Também se destacam na colheita de energia sem fio, WET, com absorção eficiente em superfícies não planas [43–45].

5 Conclusão

A execução da Atividade 4.2, no contexto da Fase III do Projeto Brasil 6G, resultou em avanços expressivos no desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à construção de redes de acesso inovadoras, com ênfase na conectividade em áreas remotas e no uso eficiente do espectro. Destaca-se, entre os resultados obtidos, a integração da rede de acesso a uma base de dados de *TV White Spaces* (TVWS), que se mostrou tecnicamente viável e promissora. Essa abordagem viabiliza o uso secundário do espectro na faixa de UHF, em conformidade com os limites regulamentares, ao mesmo tempo em que assegura a convivência harmoniosa com os sistemas de radiodifusão. Paralelamente, a análise de técnicas de redução do *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) revelou um potencial significativo para a melhoria da eficiência energética das transmissões, aspecto particularmente relevante frente às restrições de potência impostas pela regulamentação brasileira a sistemas baseados em TVWS. Já no âmbito da manipulação das propriedades de propagação por meio do uso de metasuperfícies, uma tecnologia promissora para ampliar a cobertura e otimizar o desempenho em cenários de propagação desafiadores, foi desenvolvido um protótipo funcional de metasuperfície flexível. Os resultados obtidos em ambiente laboratorial foram apresentados e analisados ao longo deste relatório, evidenciando sua viabilidade prática.

Dessa forma, os avanços alcançados até o momento reforçam a importância da experimentação prática como etapa essencial para a validação das tecnologias candidatas à rede 6G. As atividades aqui descritas constituem uma base técnica robusta para as próximas fases do projeto, contribuindo de forma decisiva para o aprimoramento das soluções investigadas e para o fortalecimento de uma infraestrutura nacional de testes voltada ao desenvolvimento da próxima geração de comunicações móveis.

Referências

- [1] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Atividade 2.1 - Definição das arquiteturas física e lógica da rede protótipo,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2022.
- [2] —, “Atividade 2.2 - Definição dos componentes de hardware da plataforma,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2022.
- [3] ABNT NBR, “Norma ABNT NBR 15601 - Televisão digital terrestre — Sistema de transmissão.” 2020.
- [4] F. Conceição, M. Gomes, V. Silva, R. Dinis, A. Silva, and D. Castanheira, “A survey of candidate waveforms for beyond 5G systems,” *Electronics*, vol. 10, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/1/21>
- [5] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldevilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, “Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, 2014.
- [6] Agência Nacional de Telecomunicações, Anatel, “Anexo à Resolução nº 747, de 05 de novembro de 2021,” 2021, [Online]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anatel-n-747-de-5-de-outubro-de-2021-350609897>. Acessado em: 20 de dezembro de 2022.
- [7] S. Ghosh, “OpenPAWS: An Open Source PAWS and UHF TV White Space Database Implementation for India,” in *2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC)*. IEEE, 2015.
- [8] J. Rodriguez, “Exploiting TV White Spaces in Europe: The COGEU Approach,” in *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*. IEEE, 2011, pp. 532–533.
- [9] Agencia Nacional del Espectro (ANE), “Gestión técnica de espacios en blanco de televisión (TVWS),” 2025, acessado em 25 de junho de 2025. [Online]. Available: <https://www.ane.gov.co/SitePages/Gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/index.aspx?p=22>
- [10] V. Chen, S. Das, L. Zhu, J. Malyar, and P. McCann, “Protocol to Access White-Space (PAWS) Databases,” RFC 7545, May 2015. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7545>
- [11] P. Kumar, L. Kansal, G. S. Gaba, M. Mounir, A. Sharma, and P. K. Singh, “Impact of peak to average power ratio reduction techniques on generalized frequency division multiplexing for 5th generation systems,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 95, p. 107386, 2021.
- [12] H. Liu, Y. Jiang, and L. Zhang, “Papr suppressing discrete fourier transform precoding-based dsss-gfdm transceiver for 5g satellite communications,” in *2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, 2020, pp. 1128–1133.
- [13] P. S. Chhavi Sharma, “Performance enhancement of generalized frequency division multiplexing using zadoff-chu precoding scheme,” *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 13, p. 1059–1067, 12 2022.

- [14] A. endang jayati, I. Wirawan, T. Suryani, and E. Endroyono, "Partial transmit sequence and selected mapping schemes for papr reduction in gfdm systems," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 12, pp. 114–122, 12 2019.
- [15] K. A. Bouslam, A. Khabba, F.-Z. Bennioui, J. Amadid, R. Iqdour, and A. Zeroual, "A hybrid technique based on zadoff-chu and simplified selective mapping for papr reduction in gfdm system," in *2023 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 2023, pp. 1–5.
- [16] X. Xue, S. Palanisamy, M. A. D. Selvaraj, O. I. Khalaf, and G. M. Abdulsahib, "A novel partial sequence technique based chaotic biogeography optimization for papr reduction in generalized frequency division multiplexing waveform," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e19451, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023066598>
- [17] S. O. Tiwari and R. Paulus, "Non-linear companding scheme for peak-to-average power ratio (papr) reduction in generalized frequency division multiplexing," *Journal of Optical Communications*, vol. 44, no. s1, pp. s1911–s1919, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0174>
- [18] Y. Li and W. Deng, "A novel piecewise nonlinear companding transform for papr reduction in gfdm," in *2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2018, pp. 1–5.
- [19] Z. Sharifian, M. J. Omid, A. Farhang, and H. Saeedi-Sourck, "Polynomial-based compressing and iterative expanding for papr reduction in gfdm," in *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2015, pp. 518–523.
- [20] B. Delgutte and J. Greenberg, *Chapter 4 - THE DISCRETE FOURIER TRANSFORM*. MIT - <https://web.mit.edu>, 1999.
- [21] GNU Radio, "GNU Radio - The Free & Open Software Radio Ecosystem," 2025, acessado em 26 de junho de 2025. [Online]. Available: <http://www.gnuradio.org>
- [22] L. Zhang, S. Mei, K. Huang, and C.-W. Qiu, "Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 4, no. 6, pp. 818–833, 2016.
- [23] T. J. Cui, "Microwave metamaterials—from passive to digital and programmable controls of electromagnetic waves," *J. Opt.*, vol. 19, no. 8, p. 084004, 2017.
- [24] G.-B. Wu, J. Y. Dai, K. M. Shum, K. F. Chan, Q. Cheng, T. J. Cui, and C. H. Chan, "A universal metasurface antenna to manipulate all fundamental characteristics of electromagnetic waves," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 5155, 2023.
- [25] S. Iqbal, M. Qian, N. Ullah, A. Noor, Y. Saifullah, A. Saleem, and S.-W. Wong, "Dual-band and dual-polarization coding metasurface for independent controls of phases and amplitudes with cross-polarized transmissions in two bands," *Results Phys.*, vol. 58, p. 107452, 2024.
- [26] M. Noman, H. Abutarboush, K. K. Qureshi, A. Zahid, F. A. Tahir, M. Imran, and Q. H. Abbasi, "Circular dichroism and cross polarization conversion using chiral metasurface," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, 2025.

- [27] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, 2019.
- [28] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. Di Renzo, and N. Al-Dhahir, “Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, 2021.
- [29] E. Basar, G. C. Alexandropoulos, Y. Liu, Q. Wu, S. Jin, C. Yuen, O. A. Dobre, and R. Schober, “Reconfigurable intelligent surfaces for 6g: Emerging hardware architectures, applications, and open challenges,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2024.
- [30] M. Ahmed, S. Raza, A. A. Soofi, F. Khan, W. U. Khan, S. Z. U. Abideen, F. Xu, and Z. Han, “Active reconfigurable intelligent surfaces: Expanding the frontiers of wireless communication-a survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2024.
- [31] J. An, M. Debbah, T. J. Cui, Z. N. Chen, and C. Yuen, “Emerging technologies in intelligent metasurfaces: Shaping the future of wireless communications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2025.
- [32] Y. Wu, H.-N. Dai, H. Wang, Z. Xiong, and S. Guo, “A survey of intelligent network slicing management for industrial iot: Integrated approaches for smart transportation, smart energy, and smart factory,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 24, no. 2, pp. 1175–1211, 2022.
- [33] H. T. Salim ALRikabi, A. H. Sallomi, H. F. KHazaal, and A. Magdy, “Review of the reconfigurable intelligent surfaces in smart cities: Opportunities, challenges, and applications,” *IET Smart Cities*, vol. 7, no. 1, p. e70003, 2025.
- [34] X. Chen, J. Tan, L. Kang, F. Tang, M. Zhao, and N. Kato, “Frequency selective surface towards 6g communication systems: A contemporary survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2024.
- [35] H.-T. Chen, A. J. Taylor, and N. Yu, “A review of metasurfaces: physics and applications,” *Rep. Prog. Phys.*, vol. 79, no. 7, p. 076401, 2016.
- [36] N. Kumar, H. Singh, M. Khatri, and N. Bhardwaj, “2D-transition metal carbides and nitrides: materials for the next generation,” in *Age of MXenes, Volume 1. Fundamentals and Artificial Intelligence: Machine Learning Interventions*. ACS Publications, 2023, pp. 1–25.
- [37] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides*, 3rd ed. Elsevier Science, 2021.
- [38] H. A. Muhammad, Y. I. Abdulkarim, P. A. Abdoul, H. N. Awl, F. A. Teksen, F. O. žkan Alkurt, M. Karaaslan, M. Bakır, and B. Appasani, “A highly flexible and low-profile metasurface antenna for wearable WBAN systems,” *Optik*, vol. 313, p. 171974, 2024.
- [39] D. Nagar, P. Ranjan, and A. Chowdhury, “Flexible metasurface loaded felt substrate built wearable antenna with tri-band and high gain features for WBAN applications,” *J. Electron. Mater.*, pp. 1–10, 2025.

- [40] X. Y. Li, L. Chen, Z. X. Cai, K. Z. Zhao, Q. Ma, J. W. You, and T. J. Cui, “Contactless electromagnetic human sensing for biomedical and healthcare applications,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 182, pp. 121–139, 2025.
- [41] K. Sasank, M. Yuvaraju, D. Samantaray, B. R. Swain, D. Ram, and S. Bhattacharyya, “Metasurface-integrated flexible antenna with enhanced bandwidth for wearable IoT devices,” in *2023 8th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC)*. IEEE, 2023, pp. 1–2.
- [42] P. Lu, Y. Xia, E. Lei, Y. Wang, and C. Song, “Airborne flexible rectifying metasurface system for wirelessly powered unmanned aerial vehicles (UAV),” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2024.
- [43] L. T. H. Hiep, B. X. Khuyen, B. S. Tung, Q. M. Ngo, V. D. Lam, and T. S. Pham, “Flexible magnetic metasurface with defect cavity for wireless power transfer system,” *Materials*, vol. 15, no. 19, p. 6583, 2022.
- [44] I. A. Shah, M. Zada, S. A. A. Shah, A. Basir, and H. Yoo, “Flexible metasurface-coupled efficient wireless power transfer system for implantable devices,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 72, no. 4, pp. 2534–2547, 2023.
- [45] H. Z. M. An, H. Xiao, and J. He, “Investigation of a transparent and wide-angle reception metasurface for microwave power transfer,” *IEEE Electron Device Lett.*, 2025.