

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Atividade 3.6 - Formatação de Quadro e Integração



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	28/07/2023	Anderson Reis Rufino Marins (Inatel) Carlos F. M. e Silva (UFC) Edilson Filho (UFC) Juliano Silveira Ferreira (Inatel) Lucas Cordeiro (UFC) Lucas dos Santos Costa (Inatel) Luciano Leonel Mendes (Inatel) Rodrigo Cavalcanti (UFC) Thiago Nóbrega (UFC) Wilker Feitosa (UFC)	Elaboração de conteúdo
2	03/08/2023	Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Figuras

1	Organização macro do símbolo, subquadro e quadro de transmissão.	5
2	A grade de recursos e a formação do bloco de recursos (numerologia 1).	6
3	Exemplo da inserção de pilotos na grade de recursos (Numerologia 1).	8
4	<i>Set-up</i> de avaliação do algoritmo de sensoriamento espectral.	10
5	Espectro do enlace de <i>downlink</i> sem a detecção do sinal de TV.	11
6	Espectro do enlace de <i>downlink</i> com a detecção do sinal de TV.	11
7	Possíveis cenários de sensoriamento espectral.	16
8	Sensoriamento espectral cooperativo centralizado (a), assistido por retransmissão (b), ou distribuído (c).	17

Lista de Tabelas

1	Parâmetros do modelo de canal.	3
2	Frequência Doppler e tempo de coerência para aplicações no agronegócio, assumindo $f_0 = 800$ MHz.	4
3	Numerologias previstas e os respectivos raios de cobertura e velocidades de terminal.	4
4	Numerologias previstas e os parâmetros principais associados.	6
5	Taxa de bits total por cada RB para forma de onda GFDM.	7
6	Taxa de bits total em 24 MHz.	7
7	Espaçamento entre pilotos de estimativa de canal para cada numerologia.	7
8	Especificações de transmissão do Transceptor Brasil 6G.	9
9	Blocos de subfaixas do espectro radioelétrico autorizadas pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) para uso secundário de dispositivos de espectro ocioso.	14
10	Classificação de técnicas de sensoriamento espectral em função da largura de banda com as quais se pode monitorar.	19

Acrônimos

5G	Quinta Geração de Rede Móvel Celular
5GNR	<i>Fifth Generation New Radio</i>
5G-RANGE	<i>Remote Area Access Network for the 5th Generation</i>
6G	Sexta Geração de Rede Móvel Celular
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BS	<i>Base Station</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CDL	<i>Clustered Delay Line</i>
CFD	<i>Cyclostationary Feature Detection</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CPSC	<i>Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation</i>
CS	<i>Cyclic Suffix</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
FC	<i>Fusion Center</i>
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i>
GLRT	<i>Generalized Likelihood Ratio Test</i>
HD	<i>Hard Decision</i>
HRD	<i>Hadamard Ratio Detector</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LMPIT	<i>Locally Most Powerful Invariant Test</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MED	<i>Maximum Eigenvalue Detection</i>
MFD	<i>Matched-Filter Detection</i>
MMED	<i>Maximum-Minimum Eigenvalue Detection</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PAWS	<i>Protocol to Access White-Space</i>

PHY *Physical Layer*
PSD *Power Spectral Density*
PSS *Primary Synchronization Signal*
PU *Primary User*
QAM *Quadrature Amplitude Modulation*
QoE *Quality of Experience*
QoS *Quality of Service*
QPSK *Quadrature Phase-Shift Keying*
RB *Resource Block*
RE *Resource Elements*
RF *Radio Frequency*
SD *Soft Decision*
SU *Secondary User*
TVWS *Television White Space*
TVDA *Televisão Digital Aberta*
UE *User Equipment*
UHF *Ultra High Frequency*
UN *United Nations*
VHF *Very High Frequency*
WSD *White Space Device*

Sumário

1	Introdução	1
2	O quadro de transmissão do transceptor Brasil 6G	2
2.1	Definições da Forma de Onda GFDM	2
2.2	Definição dos Modos de Operação	2
2.3	Estrutura de Quadro	5
2.4	A grade de recursos de transmissão	5
2.5	Sinalizações de referência	6
2.6	Resumo das especificações da estrutura de quadro do transceptor Brasil 6G	8
2.7	Sensoriamento espectral	9
3	Regulamentação Brasileira para uso de TVWSs em áreas remotas e rurais e conceitos de sensoriamento espectral	12
3.1	Contextualização	12
3.2	Regulamentação de TVWS	13
3.3	Conceitos de sensoriamento espectral	15
4	Suporte ao uso secundário do espectro utilizando tecnologia TVWS	20
4.1	Requisitos para a base de dados	20
4.2	Cenários de implantação da base de dados de TVWS	21
4.2.1	Implantação com autoridade única centralizada	21
4.2.2	Implantação com descentralização parcial	22
4.2.3	Implantação com descentralização total	22
4.3	Proposta de arquitetura descentralizada	22
5	Conclusão	24

1 Introdução

Um dos objetivos principais do projeto Brasil 6G é conceber e implementar uma plataforma de testes e avaliação de diferentes tecnologias que possam vir a compôr a futura rede de comunicação móvel, a Sexta Geração de Rede Móvel Celular (6G). Pode-se destacar o transceptor Brasil 6G como sendo um dos principais elementos previstos para compôr tal plataforma. O transceptor Brasil 6G foi concebido de forma a suportar diferentes tecnologias, bem como prover suporte à diferentes cenários de uso. Para que isso fosse possível, foi necessário especificar uma estrutura de quadro de transmissão flexível e adequada às demandas das aplicações vislumbradas para a futura rede. O presente relatório apresenta detalhes a respeito da estrutura de quadro de transmissão desenvolvida para o transceptor Brasil 6G.

O transceptor Brasil 6G foi concebido visando prover conectividade em áreas remotas e rurais, já que esta é uma importante demanda nacional que não foi corretamente endereçada nas discussões de padronização da Quinta Geração de Rede Móvel Celular (5G). Visando propiciar a maior área de cobertura e tendo em vista a baixa ocupação do espectro de TV em tais áreas, elegeram-se inicialmente a banda de *Ultra High Frequency* (UHF) como banda de operação do transceptor Brasil 6G. Sendo assim, o transceptor deve fazer uso de forma oportunística dos canais de TV livres no espectro, caracterizando o mesmo como sendo um sistema de *Television White Space* (TVWS). O presente relatório apresenta uma visão da regulamentação brasileira atualmente aplicável aos sistemas de TVWS, bem como uma introdução a conceitos e técnicas de sensoriamento espectral. Estas técnicas podem ser empregadas por sistemas de TVWS para identificação dos canais ocupados e dos canais livres no espectro de forma que os serviços de TVWS possam operar de maneira harmoniosa com os usuários primários, ou *Primary Users* (PUs), do espectro de UHF, que são as radiodifusoras de TV.

O presente relatório apresenta também uma visão de tecnologias complementares que podem ser utilizadas para a correta definição e alocação de canais entre diferentes sistemas de TVWS.

Visando alcançar seus objetivos, o presente relatório foi organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma visão da estrutura do quadro de transmissão empregada pelo transceptor Brasil 6G; a Seção 3 apresenta um resumo da regulamentação dos serviços de TVWS no Brasil, bem como técnicas de sensoriamento espectral que podem servir de base para a identificação de canais livres no espectro radioelétrico; a Seção 4 apresenta uma visão de tecnologias complementares para o compartilhamento de espectro entre diferentes sistemas de TVWS; a Seção 5, por fim, apresenta a conclusão do relatório.

2 O quadro de transmissão do transceptor Brasil 6G

Anderson Reis Rufino Marins, Juliano Silveira Ferreira, Luciano Leonel Mendes
 anderson@inatel.br, silveira@inatel.br, luciano@inatel.br

O projeto Brasil 6G definiu o transceptor Brasil 6G como um elemento principal de sua plataforma, pois este equipamento é essencial para a rede de acesso Brasil 6G. O transceptor foi concebido para prover suporte às diferentes funcionalidades e visa atender aos diferentes cenários de uso que foram definidos no contexto de áreas remotas e rurais. Além disso, a concepção foi realizada levando em consideração as condições impostas pelos canais de propagação previstos, bem como a operação fazendo uso do TVWS.

Devido ao fato das aplicações e cenários de uso previstos para a operação do transceptor Brasil 6G demandarem da camada *Physical Layer* (PHY) requisitos conflitantes entre si, o transceptor Brasil 6G foi concebido para suportar diversos modos de operação. Cada modo contempla parâmetros específicos para a operação do sistema que foram levados em consideração para compor o quadro de transmissão do transceptor, onde estão também definidos os recursos para a transmissão dos sinais de referência utilizados para fins de sincronização e estimação de canal pelo receptor.

Sendo assim, foi definida uma estrutura de quadro de transmissão para o transceptor Brasil 6G que é bastante flexível e versátil, que utiliza como plataforma base a estrutura de quadro definida para o transceptor *Remote Area Access Network for the 5th Generation* (5G-RANGE) [1], cujo detalhamento encontra-se apresentado nas seções seguintes.

2.1 Definições da Forma de Onda GFDM

O transceptor Brasil 6G considera o uso da forma de onda com múltiplas portadoras denominada de *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM), sendo o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), empregado no *Long Term Evolution* (LTE) e no 5G, é um caso particular desta forma de onda. Isto significa que o transceptor Brasil pode operar tanto como GFDM quanto com o OFDM, dependendo da parametrização da camada física. As principais diferenças conceituais destas formas de onda são:

- Um símbolo OFDM é formado por k subportadoras moduladas por símbolos *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), representados por um pulso retangular;
- Um símbolo GFDM é formado por k subportadoras, sendo que cada subportadora transporta m subsímbolos QAM, cada um representado um um pulso genérico $g[n]$ deslocado de forma circular no domínio do tempo.

Tanto o OFDM quanto o GFDM empregam um *Cyclic Prefix* (CP) para proteger as informações da dispersão temporal introduzida pelo canal com múltiplos percursos. Um *Cyclic Suffix* (CS) também é introduzido para permitir a aplicação de um janelamento no domínio do tempo, que visa melhorar a emissão fora da faixa da forma de onda em banda-base.

2.2 Definição dos Modos de Operação

O transceptor Brasil 6G prevê a operação em diferentes numerologias, sendo estas definidas para atender diferentes cenários ou casos de uso. A numerologia selecionada define o espaçamento entre as subportadoras, o tempo de símbolo e a duração do CP e CS. Assim, é possível

adequar a camada física para suportar os requisitos dos diferentes cenários, como maior robustez aos múltiplos percursos ou menor sensibilidade ao efeito Doppler.

As principais premissas que devem ser observadas para a seleção de uma dada numerologia são:

- o canal deve ser lento, ou seja, o tempo de símbolo deve ser menor que o tempo de coerência do canal [2];
- o canal deve ser plano para cada subportadora, ou seja, a banda de coerência do canal deve ser maior do que a largura de faixa de uma subportadora [2];
- para a estimação do canal por interpolação de portadoras piloto no domínio da frequência, a distância espectral entre duas portadoras piloto deve ser menor do que a banda de coerência do canal [3];
- para a estimação do canal por preâmbulo, este deve ser mais longo que a resposta ao impulso do canal [4];
- a duração do CP deve ser maior que a máxima duração da resposta ao impulso do canal [3].

O modelo de canal empregado no projeto do sistema é o *Clustered Delay Line* (CDL) [5], de forma que a banda de coerência de 90% é dada por [6]

$$B_c = \frac{1}{50\sigma_\tau}, \quad (1)$$

onde σ_τ é o *delay spread* do canal. A Tabela 1 apresenta o valor da banda de coerência para diferentes canais sem fio.

Tabela 1: Parâmetros do modelo de canal.

Modelo de Canal	σ_τ	Duração da resposta ao impulso (τ_{\max})	Largura da Banda de Coerência (B_c)
Geral (CDL-A)	100 ns	966 ns	200 kHz
Geral (CDL-D)	100 ns	1253 ns	200 kHz
D2D (CDL-A)	500 ns	4893 ns	40 kHz
D2D (CDL-D)	500 ns	6263 ns	40 kHz

Como apresentado anteriormente, para evitar *Inter Symbol Interference* (ISI), o CP deve ter duração maior que a duração da resposta ao impulso do canal. Em [7], os autores propõem que o comprimento do CP deve ser 18% do tempo de propagação da onda eletromagnética no sentido *Base Station* (BS) até a borda da célula, de tal forma que

$$T_{\text{CP}} \geq 0,18 \cdot r/c, \quad (2)$$

onde, r é o raio da célula em metros e c é a velocidade da luz em m/s.

Sendo assim, para os casos de uso que requeiram um raio de cobertura da ordem de 100 km, deve-se considerar um CP com duração superior a $60\mu\text{s}$. Um símbolo com longa duração é adequado para as aplicações com baixa mobilidade devido a sua vulnerabilidade

ao efeito Doppler. Considerando o canal variante no tempo com espectro de *Jakes*, o tempo de coerência de 50% é dado por [3]

$$T_c = \frac{9}{16\pi \cdot f_D}, \quad (3)$$

onde, f_D é a frequência Doppler definida como

$$f_D = \frac{v \cdot f_0}{c} \quad (4)$$

sendo f_0 a frequência de operação em Hz e v a velocidade relativa entre transmissor e receptor em m/s.

A Tabela 2 mostra os requisitos de velocidade e os respectivos valores de tempo de coerência e frequência Doppler para algumas aplicações importantes para o agronegócio [8].

Tabela 2: Frequência Doppler e tempo de coerência para aplicações no agronegócio, assumindo $f_0 = 800$ MHz.

Aplicação	Velocidade [km/h]	Frequência Doppler [Hz]	T_c [ms]
Backhaul	0	0	∞
<i>Smart farms</i>	60	44,5	4
Coleta de dados de veículos e drones	120	88,9	2

É possível verificar a partir da Tabela 2 que a duração máxima do símbolo da forma de onda depende da velocidade. Logo, a camada física deve ter numerologias compatíveis para cada uma das aplicações. A partir da definição de uma estrutura de quadro de transmissão com numerologia escalável é possível definir modos de operação que permitam adequar a robustez frente aos múltiplos percursos e ao efeito Doppler e, assim, atender de maneira mais apropriada diferentes casos de uso.

A Tabela 3 mostra as numerologias inicialmente concebidas para a operação da camada PHY do transceptor Brasil 6G. A tabela em questão mostra o alcance teórico máximo e as velocidades dos terminais *User Equipment* (UE) suportadas para cada uma das numerologias previstas.

Tabela 3: Numerologias previstas e os respectivos raios de cobertura e velocidades de terminal.

Numerologia	Espaçamento entre subportadoras [kHz]	CP [μ s]	Símbolo [μ s]	Número de Subsímbolos	Número de Subportadoras	Raio de cobertura [km]	Velocidade do móvel suportada [km/h]
0	1,875	141,7	2133,3	4	16384	236,11	7
1	3,75	70,8	1066,7	4	8192	118,06	15
2	7,5	35,4	533,3	4	4096	59,03	30
3	15	17,7	266,7	4	2048	29,51	60
4	30	8,9	133,7	4	1024	14,76	120
5	30	4,4	66,7	2	1024	7,38	240

2.3 Estrutura de Quadro

Conforme evidenciado anteriormente, o transceptor Brasil 6G foi concebido prevendo o suporte a diferentes numerologias, sendo estas necessárias para o atendimento adequado a diferentes casos de uso. A estrutura de quadro foi proposta a partir das numerologias descritas na Seção 2.2.

O símbolo GFDM é a unidade básica do quadro. O símbolo GFDM é agrupado em subquadros ou com duração 4,6 ms. Os subquadros, por sua vez, são agrupados em quadros. A Figura 1 mostra um exemplo do quadro e do subquadro para as numerologias 0 e 1. A duração do símbolo GFDM e do CP é definida em função do espaçamento de subportadoras, de forma que existe sempre um número inteiro de símbolos GFDM em um subquadro, conforme ilustrado na figura. Pode-se notar que há um período de silêncio em cada início de quadro, bem como um preâmbulo. O período de silêncio é necessário para que os terminais possam realizar o sensoriamento espectral dentro da banda de operação, enquanto que o preâmbulo é empregado na sincronização temporal. Inicialmente foi adotada que o quadro tem duração total de 32 subquadros ($i = 32$ vide Figura 1).

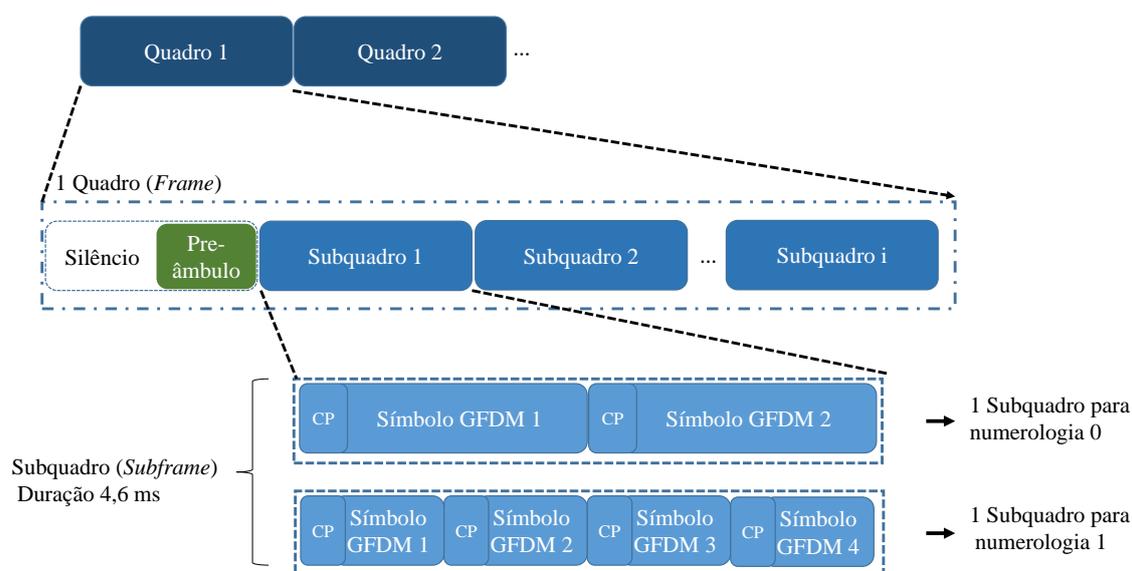


Figura 1: Organização macro do símbolo, subquadro e quadro de transmissão.

A Tabela 4 apresenta a duração do quadro e subquadro definida para diferentes numerologias inicialmente concebidas para o transceptor Brasil 6G.

2.4 A grade de recursos de transmissão

A grade de recursos do transceptor Brasil 6G é a estrutura de organização de dados no domínio do tempo e da frequência correspondente à transmissão de um símbolo da forma de onda empregada. A forma de onda com múltiplas portadoras transmite símbolos que duram certos períodos de tempo e que são formados, no domínio da frequência, por um determinado número de subportadoras. A Figura 2 mostra a representação gráfica da referida grade de recursos de transmissão no domínio tempo-frequência. A grade de recursos é subdividida, por sua vez, em blocos de recursos ou *Resource Blocks* (RBs). Os RBs, portanto, estão associados à uma fração dos recursos de tempo-frequência disponíveis na grade de transmissão.

Tabela 4: Numerologias previstas e os parâmetros principais associados.

Numerologia	Espaçamento entre subportadoras (kHz)	Duração do símbolo (μs)	CP (μs)	CS (μs)	Símbolos por Subquadro
0	1,875	2133,33	141,7	25	2
1	3,75	1066,67	70,8	12,5	4
2	7,5	533,33	35,4	6,25	8
3	15	266,67	17,7	3,13	16
4	30	133,33	8,9	1,57	32
5	30	66,67	4,4	0,78	64

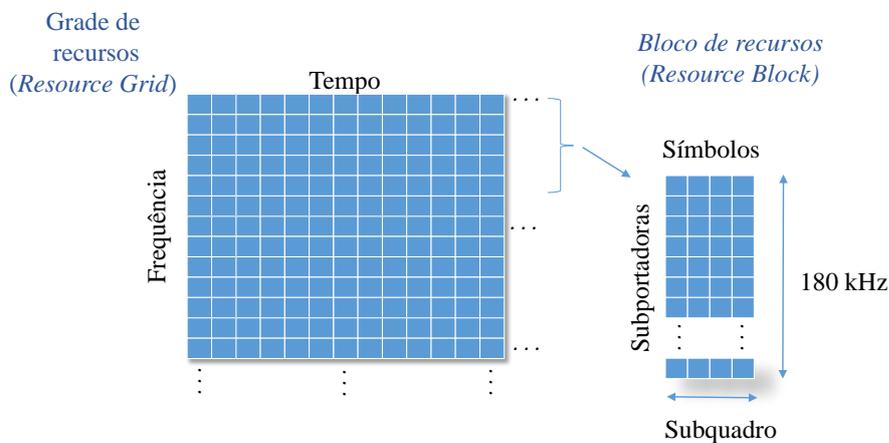


Figura 2: A grade de recursos e a formação do bloco de recursos (numerologia 1).

A concepção do transceptor Brasil 6G estabelece que a alocação de recursos de transmissão será realizada em números inteiros de RBs. Um RB tem largura de banda fixa e igual à 180 kHz e tem duração de 1 subquadro, conforme ilustrado na Figura 2. Para o caso da numerologia 3, onde as subportadoras são espaçadas de 15 kHz, cada RB equivale a 12 subportadoras. Esta configuração em específico é similar à adotada no LTE e *Fifth Generation New Radio* (5G NR).

Cada RB é formado pelos chamados elementos de recursos ou *Resource Elements* (RE) que corresponde à unidade básica de transporte de informação, ou seja, corresponde à cada subsímbolo transportado em cada subportadora. A quantidade de REs efetivos que estão disponíveis para a transmissão de dados (descontando as pilotos de referência) a cada subquadro para cada numerologia está mostrada na Tabela 5. A Tabela 5 mostra também a taxa de bits total (taxa que contempla informações do usuário mais paridades do código corretor de erro e cabeçalhos de controle) prevista para 1 RB, assumindo mapeamento variando de *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) até 256-QAM.

A Tabela 6 mostra a taxa de bits teórica total prevista para o PHY do transceptor Brasil 6G considerando a largura de banda de *downlink* de 24 MHz (132 RBs).

2.5 Sinalizações de referência

A estrutura do quadro de transmissão define a posição dos sinais de referência necessários para a sinalização e avaliação das condições do canal de comunicação ou *Channel State Infor-*

Tabela 5: Taxa de bits total por cada RB para forma de onda GFDM.

Num.	Esp. Subpor. [kHz]	Num. de Subportadoras	Num. de Subsímbolos	Num. de RE's efetivos	Taxa de bits por RB(kbps)			
					QPSK	16 QAM	64 QAM	256 QAM
0	1,875	96	4	672	292,17	584,35	876,52	1168,70
1	3,75	48	4	720	313,04	626,09	939,13	1252,17
2	7,5	24	4	720	313,04	626,09	939,13	1252,17
3	15	12	4	720	313,04	626,09	939,13	1252,17
4	30	6	4	720	313,04	626,09	939,13	1252,17
5	30	6	2	736	320,00	640,00	960,00	1280,00

Tabela 6: Taxa de bits total em 24 MHz.

Numerologia	Taxa de bits [Mbps]			
	QPSK	16 QAM	64 QAM	256 QAM
0	38,57	77,13	115,70	154,27
1	41,32	82,64	123,97	165,29
2	41,32	82,64	123,97	165,29
3	41,32	82,64	123,97	165,29
4	41,32	82,64	123,97	165,29
5	42,24	84,48	126,72	168,96

mation (CSI). Nesta seção será apresentado um resumo das principais sinalizações de referência previstas na estrutura de quadro do transceptor Brasil 6G.

A estrutura de quadro de transmissão do transceptor Brasil 6G considera a transmissão de um preâmbulo ou *Primary Synchronization Signal* (PSS) no início de cada quadro, após o período de silêncio, conforme ilustrado na Figura 1. Este preâmbulo é utilizado como referência para o sincronismo temporal e identificação do tempo do símbolo.

A estrutura do quadro de transmissão define também pilotos de referência que são utilizadas para a estimação das condições do canal de comunicação. Cada subquadro transmite subportadoras pilotos que são inseridas em posições específicas na grade de recursos de transmissão. O espaçamento no domínio do tempo e da frequência entre as pilotos de referência na grade de recursos de transmissão para cada numerologia está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Espaçamento entre pilotos de estimativa de canal para cada numerologia.

Numerologia	Espaçamento na frequência (subportadoras)	Espaçamento na frequência (kHz)	Espaçamento no tempo (símbolos)	Espaçamento no tempo (μ s)
0	4	7,5	2	4600,0
1	4	15,0	4	4600,0
2	4	30,0	4	2300,0
3	4	60,0	4	1150,0
4	4	120,0	4	575,0
5	6	180,0	4	287,5

A Figura 4 mostra um exemplo de posicionamento das pilotos de referência para estimação de canal na grade de recursos para um espaçamento de 4 portadoras na frequência e 4 símbolos no tempo.

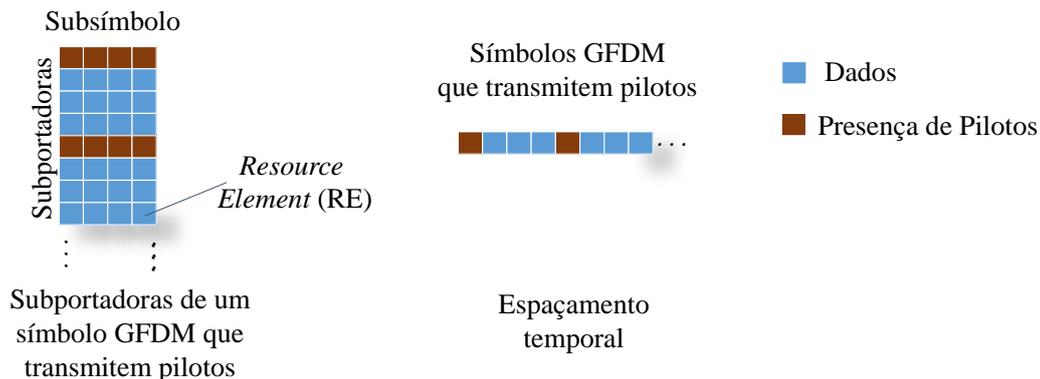


Figura 3: Exemplo da inserção de pilotos na grade de recursos (Numerologia 1).

As portadoras pilotos transmitem símbolos definidos por uma sequência de *Zadoff-Chu* [9] que é conhecida no receptor, permitindo estimar a resposta do canal nas frequências destas pilotos. As estimativas obtidas nas frequências das pilotos são interpoladas para se obter a estimativa da resposta em frequência do canal e, assim, realizar a equalização no domínio da frequência.

2.6 Resumo das especificações da estrutura de quadro do transceptor Brasil 6G

As especificações definidas para o transceptor Brasil 6G definidas a partir da estrutura de quadro de transmissão foram resumidas na Tabela 8, onde é possível concluir que a estrutura de quadro proposta é flexível para atender os diferentes modos de operação.

Tabela 8: Especificações de transmissão do Transceptor Brasil 6G.

Brasil 6G						
	Numerologia da Forma de Onda					
Identificação	0	1	2	3	4	5
Taxa de amostragem (MHz)	30,72					
Forma de onda	GFDM (OFDM com configuração especial)					
Pulso protótipo	Cosseno elevado					
Fator de <i>roll-off</i>	0					
Tipo de Janela	Cosseno elevado					
Espaçamento de subportadora (kHz)	1,875	3,75	7,5	15	30	30
Número de subportadoras	16384	8192	4096	2048	1024	1024
Número de subportadora ativa (Largura de faixa de 23,76 MHz)	12672	6336	3168	1584	792	792
Número de subsímbolos	4	4	4	4	4	4
Duração de CP (μ s)	141,7	70,8	35,4	17,7	8,9	4,4
Duração de CS (μ s)	25	12,5	6,25	3,13	1,56	0,78
Duração do símbolo (μ s)	2133,3	1066,7	533,3	266,7	133,7	66,7
Símbolo estendido (μ s)	2300	1150	575	287	147,75	71,9
Eficiência da extensão cíclica	2300	1150	575	287	147,75	71,9
Modulação	QPSK a 256 QAM	QPSK a 256 QAM	QPSK a 256 QAM	QPSK a 256 QAM	QPSK a 256 QAM	QPSK a 256 QAM
Alcance de proteção do CP (km)	230	120	60	30	14	7
Velocidade do móvel alvo (km/h)	7	15	30	60	120	240
Espaçamento de piloto (subportadoras)	4	4	4	4	4	8
Espaçamento de piloto (símbolos)	2	4	4	4	4	4
Taxa de bits total de transmissão (descontando pilotos)						
<i>Bandwidth</i> (BW) 23,76 MHz (132 RBs)						
QPSK	38,57	41,32	41,32	41,32	41,32	42,24
16-QAM	77,13	82,64	82,64	82,64	82,64	84,48
64-QAM	115,70	123,97	123,97	123,97	123,97	126,72
256-QAM	154,27	165,29	165,29	165,29	165,29	168,96

2.7 Sensoriamento espectral

Os transceptores Brasil 6G utilizam TVWS, cuja regulamentação atual encontra-se descrita na Seção 3.2. A estrutura de quadro permite que o sensoriamento espectral dentro da banda ocupada pela rede, conforme ilustrado na Seção 2.3. Durante o período de silêncio, os terminais podem analisar se há a presença de um sinal de TV na banda utilizada ou se o mesmo continua disponível para a operação da rede secundária. As UEs realizam o sensoriamento e reportam o status do canal para a BS, que define se há ou não a presença de um primário no canal empregado.

A técnica de sensoriamento implementada é baseada na detecção de energia associada à informações específicas do padrão de TV Digital empregado no Brasil que é o ISDB-T/Tb [10]. As informações utilizadas se referem, por exemplo, aos possíveis tempos de duração dos símbolos OFDM e os correspondentes comprimentos de CP previstos no referido padrão. Vale destacar que a implementação inicial de sensoriamento espectral no transceptor Brasil 6G considera alguns pontos específicos como, por exemplo, o emprego de até 4 canais contíguos de UHF, totalizando 24 MHz de largura de banda, e que ao menos o primeiro destes canais deve estar desocupado.

A Figura 4 mostra uma visão do *set-up* empregado para os testes iniciais em laboratório do algoritmo de sensoriamento espectral integrado no transceptor Brasil 6G. Os equipamentos

indicados por 1 são os *front-ends* de *Radio Frequency* (RF) da BS e da UE; o equipamento indicado por 2 é o transmissor de TV Digital. O sinal deste transmissor é atenuado pelo dispositivo indicado por 3 e é então combinado com o sinal de RF da BS através do dispositivo indicado por 4. O sinal combinado é entregue à UE e ao analisador de espectro, indicado por 5 na figura.

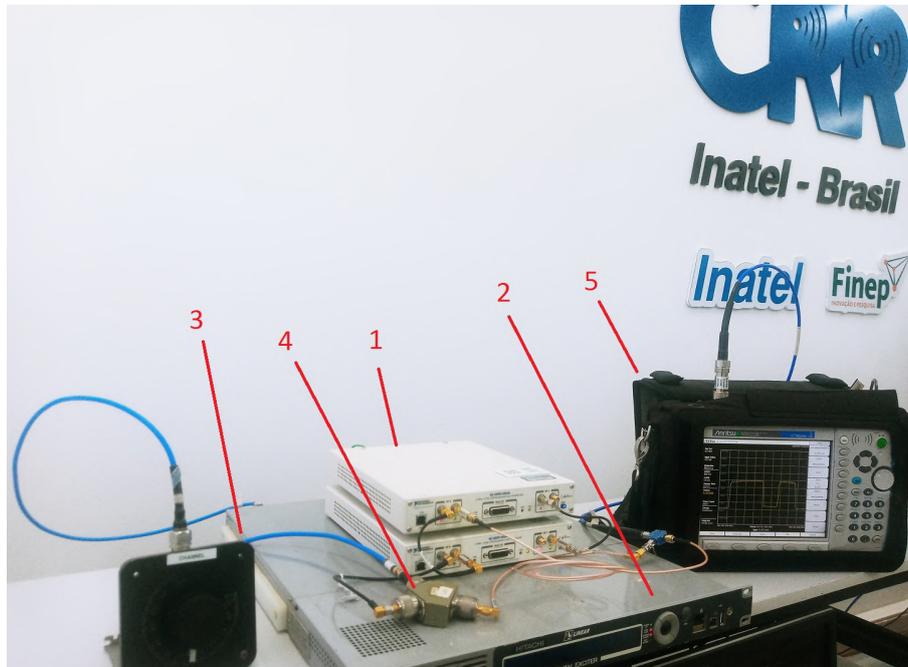


Figura 4: *Set-up* de avaliação do algoritmo de sensoriamento espectral.

A Figura 5 mostra a medida do espectro ocupado pelo enlace de *downlink* sem a detecção do sinal de TV, ou seja, os 4 canais contíguos de UHF foram empregados pela BS. A Figura 6, por sua vez, mostra a condição do espectro mediante a detecção do sinal de TV. Neste caso, um canal de UHF está sendo ocupado pelo transmissor de TV, enquanto os outros 3 canais estão sendo utilizados pelo enlace de *downlink* da rede de acesso Brasil 6G. Desta forma, pode-se evidenciar a funcionalidade do algoritmo de sensoriamento espectral implementado no transceptor Brasil 6G.

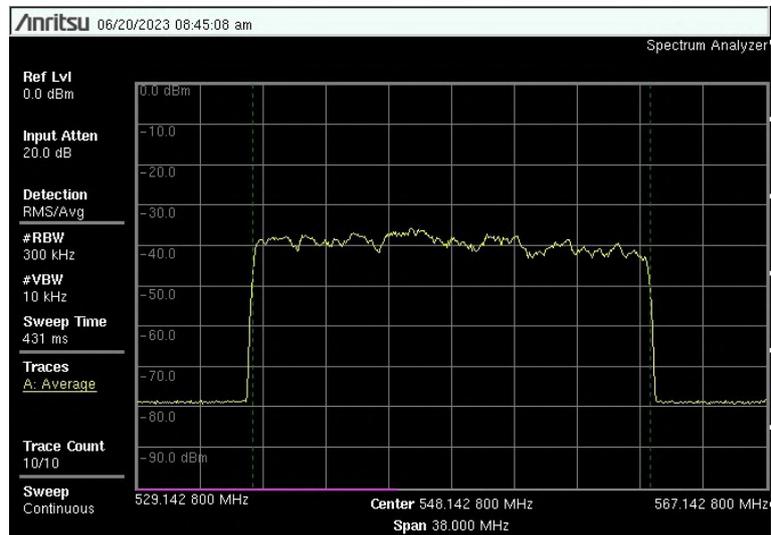


Figura 5: Espectro do enlace de *downlink* sem a detecção do sinal de TV.

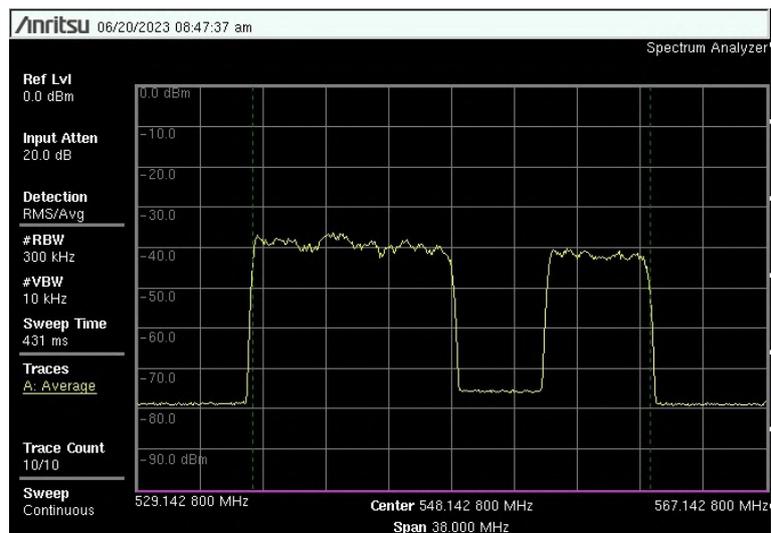


Figura 6: Espectro do enlace de *downlink* com a detecção do sinal de TV.

3 Regulamentação Brasileira para uso de TVWSs em áreas remotas e rurais e conceitos de sensoriamento espectral

Lucas dos Santos Costa
lucass@inatel.br

A seguir serão apresentadas uma visão geral sobre a regulamentação de uso de TVWSs nas áreas remotas e rurais brasileiras e sobre conceitos e técnicas de monitoramento de espectro.

3.1 Contextualização

O crescimento constante da demanda por novas soluções de telecomunicações viabilizou a revolução dos sistemas de comunicação sem fio nos últimos anos [11]. As maiores evidências desse fato são os adventos recentes da *Internet of Things* (IoT) [12] e do 5G [13], que dentre outras vantagens, além de terem proporcionado grandes melhorias em termos de qualidade de serviço, ou *Quality of Service* (QoS), e qualidade de experiência, ou *Quality of Experience* (QoE), também resultaram em um aumento sem precedentes do número de funcionalidades, tecnologias, e de dispositivos conectados. Porém, apesar de toda essa evolução, melhorias, e vantagens, historicamente o desenvolvimento dos sistemas de comunicação parece ter sido concentrado em soluções voltadas para as demandas dos grandes centros urbanos [14], e por isso até então não têm havido soluções específicas para atender as demandas de conectividade das áreas remotas e rurais. Não bastasse isso, assim como em território brasileiro, pesquisas direcionadas ao 6G [15] já se iniciaram mundo afora e, com base nas especulações sobre os avanços que ela poderá proporcionar, nota-se que as soluções previstas estão novamente sendo direcionadas para as demandas advindas das áreas com alta densidade populacional, e que, portanto, as necessidades das áreas remotas e rurais parecem estar mais uma vez em segundo plano.

Um dos objetivos do projeto Brasil 6G [16] é justamente tentar contribuir efetivamente para o fechamento dessa lacuna por meio de propostas de soluções tecnológicas que possam atender as demandas de conectividade das áreas remotas e rurais, num primeiro passo das áreas remotas e rurais brasileiras, mas não limitadas tão somente a elas, visando uma possível influência no processo de padronização do 6G bem como das próximas gerações dos sistemas de comunicação. Mundialmente, a opção que tem se mostrado como a mais promissora por meio da qual o provimento dessas soluções torna-se viável é a exploração dos canais de televisão que começaram a se tornar ociosos/vagos à medida que a televisão analógica começou a ser substituída pela televisão digital devido a maior eficiência espectral da radiodifusão digital [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Esses canais são comumente conhecidos como espaços em branco de televisão, ou TVWSs, e no Brasil estão localizados nas subfaixas do espectro radioelétrico dentro da faixa de *Very High Frequency* (VHF), no intervalo de 54 a 216 MHz, e dentro da faixa de UHF, de 470 a 698 MHz [26].

O uso dos recursos espectrais na faixa do espectro radioelétrico sempre esteve fundamentado na chamada Política de Alocação Fixa de Banda, na qual agências reguladoras concedem direito de uso exclusivo sobre determinada faixa espectral ao usuário contratante, ou PU, durante todo o período contratado. No entanto, os problemas da escassez e subutilização espectral, decorrentes respectivamente do recente aumento explosivo de demanda por novos serviços e atividades de telecomunicações e da ociosidade de determinadas faixas em algumas localidades devido a baixa taxa de acessos dos respectivos PUs durante o tempo de contratação, levaram

as agências reguladoras à ideia de substituição da política de acesso fixo em vigor por uma nova política de acesso denominada Política de Acesso Dinâmico de Banda [27].

Diferentemente da tradicional política de acesso fixo, a nova política de acesso dinâmico de banda prevê o compartilhamento das faixas espectrais primárias com usuários não contratantes, ou *Secondary Users* (SUs), significando que o direito de uso até então conferido aos PUs deve ser reduzido de Exclusivo para Prioritário, devendo os SUs respeitarem as restrições de interferência máxima preestabelecidas pela rede primária a fim de nunca causarem interferências prejudiciais às transmissões dos PUs. Por isso fica claro que no contexto de TVWSs a exploração dos canais de televisão deve ser feita de forma secundária e as soluções de conectividade devem garantir proteção contra interferências que possam prejudicar a qualidade dos serviços de radiodifusão nas áreas remotas e rurais.

O conceito de sensoriamento espectral baseado em rádios cognitivos surgiu nesse contexto de acesso dinâmico ao espectro radioelétrico como uma possível solução para a redução dos problemas da escassez e subutilização espectral. Neste contexto um rádio cognitivo é geralmente definido como um SU inteligente, o qual, por meio do sensoriamento espectral, torna-se capaz de identificar faixas espectrais ociosas e de prover uso secundário e oportunista às faixas primárias do espectro radioelétrico atendendo as restrições de interferência máxima preestabelecidas pela rede primária [28]. Por esse motivo as agências reguladoras têm reconhecido no uso adicional de sensoriamento espectral combinado com o uso obrigatório de bancos de dados de geolocalização um potencial benefício para garantir a adequada proteção para os sistemas de radiodifusão nas áreas remotas e rurais [29, 30, 31].

Portanto, considerando o que foi exposto nesta contextualização, e também o fato de que a exploração de TVWSs no Brasil prevê o uso combinado de bancos de dados de geolocalização e sensoriamento espectral para garantir proteção e interoperabilidade entre os sistemas primários e secundários, a seguir a Seção 3.2 apresenta uma visão geral das regulamentações de uso de TVWSs que devem ser consideradas para as soluções de conectividade secundária nas áreas remotas e rurais brasileiras, e a Seção 3.3 uma visão geral dos principais conceitos e técnicas de sensoriamento espectral.

3.2 Regulamentação de TVWS

Os canais de televisão estão localizados na faixa do espectro radioelétrico, sendo este um bem natural, público e escasso, gerenciado globalmente pela *International Telecommunication Union* (ITU) com base nas padronizações e regulamentações estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), ou *United Nations* (UN), para reger as telecomunicações internacionais [32, 33]. No entanto, o uso dos recursos espectrais na faixa do espectro radioelétrico deve ser administrado autonomamente por cada país. No Brasil, por exemplo, essa administração é de responsabilidade da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [34], que controla o acesso aos recursos espectrais por meio da atribuição e alocação fixa de banda a PUs de acordo com as subfaixas definidas em tratados e acordos internacionais, aprovadas pela ITU, conforme a emissão do plano anual de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequência.

Em 05 de outubro de 2021, o Diário Oficial da União publicou a Resolução ANATEL N° 747 [26] por meio da qual a agência divulga a aprovação do regulamento para as condições de uso de TVWSs e as atribuições e alocações de dez blocos com subfaixas de 6 MHz cada, na faixa de VHF, de 54 a 72 e de 174 a 216 MHz, e trinta e sete blocos com subfaixas de 6 MHz cada, na faixa de UHF, de 470 a 608 e de 614 a 698 MHz, conforme mostra a Tabela 9, para a exploração secundária por parte dos chamados dispositivos de espectro ocioso, ou *White Space*

Devices (WSDs), sob a restrição de garantia de proteção contra interferências prejudiciais aos serviços de radiodifusão e de outros serviços secundários através do uso de bases de dados de geolocalização, que são sistemas de bancos de dados que contêm os serviços autorizados a serem operados pelos WSDs, bem como do uso adicional de sensoriamento espectral, se necessário. A partir dessas ações a ANATEL pretende otimizar o uso do espectro radioelétrico no Brasil, adequando-o à evolução tecnológica, à necessidade de garantir proteção contra interferências prejudiciais aos serviços primários, e à necessidade de acesso das pequenas prestadoras de serviços de telecomunicações, que operem nas áreas de baixa densidade demográfica, urbana ou rural, a fim de ampliar o alcance dos serviços de voz, dados e de Internet.

Tabela 9: Blocos de subfaixas do espectro radioelétrico autorizadas pela ANATEL para uso secundário de dispositivos de espectro ocioso [26].

Blocos das Subfaixas de Radiofrequências em VHF e UHF												
	VHF						UHF					
Bloco	1	2	3	4	...	10	11	...	33	34	...	47
Canal	2	3	4	7	...	13	14	...	36	38	...	51
Subfaixa [MHz]	54 a 60	60 a 66	66 a 72	174 a 180	...	210 a 216	470 a 476	...	602 a 608	614 a 620	...	692 a 698

De acordo com a Resolução N° 747, a ANATEL determina que as informações dos bancos de dados de geolocalização devem ser públicas, conter a ocupação atual das subfaixas dos canais de VHF e UHF por serviços de radiodifusão ou dos WSDs, além de conter os serviços autorizados a serem operados por WSDs. A base de dados deve privilegiar os requisitos técnicos de operação que favoreçam a disponibilização de subfaixas para uso secundário que resultem na maior separação entre as frequências dos serviços prestados por WSDs e as frequências autorizadas para os serviços de radiodifusão. Além disso, a base de dados também deve priorizar as frequências da faixa de VHF sempre que possível, o que pode ser uma vantagem para os serviços de telecomunicações em um país de dimensão continental, já que o maior enlace de comunicação procede da menor frequência de operação. Adicionalmente, a potência efetiva isotropicamente radiada, ou *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP), dos WSDs deve ser a menor possível: apenas a suficiente para oferecer adequada confiabilidade e boa QoS. Ainda, nenhum WSD deve operar com potência máxima de pico superior a 1 *Watt* (ou 30 dBm) na saída de seu transmissor, e essa parece ser a restrição mais significativa imposta pela ANATEL até o momento. Por fim, os requisitos quanto aos limites de emissão fora de faixa e de espúrios, quanto às condições adicionais de operação, e quanto às condições para proteção dos serviços de radiodifusão, devem ser definidos por ato da administradora.

É importante ressaltar que o uso de técnicas adicionais pode ser necessário para contornar os impactos que podem surgir devido a restrição de potência máxima de pico determinada pela ANATEL, como a redução do tamanho das áreas de cobertura, por exemplo. Logo, combinada com os outros requisitos, tais como o uso obrigatório de base de dados de geolocalização e a adoção sob demanda de sensoriamento espectral, as regulamentações da ANATEL formam um cenário consideravelmente restritivo objetivando a coexistência harmoniosa dos sistemas primários e secundários de comunicação. Com isso é possível concluir que a exploração confiável de TVWSs nas áreas remotas e rurais do Brasil pode requerer a implementação de técnicas avançadas de transmissão digital que sejam capazes de contribuir para o alcance de maiores enlaces de comunicação, melhor qualidade de cobertura, e baixa interferência.

3.3 Conceitos de sensoriamento espectral

O uso de sensoriamento espectral combinado com o uso de bancos de dados de geolocalização tem sido estudado como uma opção viável para as soluções de conectividade em áreas remotas e rurais via exploração de TVWSs por vários países [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Como pôde ser constatado na Seção 3.2, essa é também a opção considerada no Brasil. Por isso, a seguir apresentam-se as principais informações sobre sensoriamento espectral baseado em rádios cognitivos.

O sensoriamento espectral pode ser visto como um teste binário de hipóteses, dado por \mathcal{H}_0 ou \mathcal{H}_1 , em que \mathcal{H}_0 representa a hipótese de uma determinada faixa espectral sob sensoriamento estar desocupada, e \mathcal{H}_1 , a hipótese dessa faixa estar ocupada. O objetivo do sensoriamento espectral é observar determinada faixa espectral e, com base nessa observação, tomar uma decisão sobre sob qual dessas hipóteses ela se encontra. Para alcançar esse objetivo, rádios cognitivos, ou SUs, ou, equivalentemente, WSDs (termo mais comumente usado no contexto de uso secundário de TVWSs em áreas remotas e rurais) inteligentes, realizam o sensoriamento espectral sobre a faixa de interesse ao longo de um dado período de observação a fim de computar uma estatística de teste, T , a partir das amostras de sensoriamento coletadas, e compará-la com um limiar de decisão, τ , predefinido. A decisão sobre a hipótese a qual se encontra essa faixa, ou, simplesmente, a decisão de ocupação da faixa de interesse, é tomada em favor da hipótese \mathcal{H}_1 se $T > \tau$, ou em favor da hipótese \mathcal{H}_0 caso contrário.

O objetivo da rede secundária com o sensoriamento espectral é prover acesso aos SUs às faixas espectrais. Esse acesso pode ser efetuado em modo *Undelay*, *Overlay*, ou *Interweave* [35, 36, 37]. *Undelay* e *Overlay* são os modos de acesso nos quais as ocupações secundárias podem ser simultâneas às primárias, sendo que em cada caso as transmissões dos SUs devem ocorrer de forma subjacente ou auxiliar à dos PUs, respectivamente. Mais especificamente, no modo *Undelay* a potência de transmissão dos SUs não deve exceder o patamar máximo preestabelecido pela rede primária a fim de manter as interferências da rede secundária à níveis aceitáveis pela rede primária. Alternativamente, no modo *Overlay* é permitido aos SUs que suas potências de transmissão alcancem o nível máximo preestabelecido pela regulamentação. Porém, parte dessa potência deve ser dedicada a auxiliar as transmissões primárias, e com isso também mantendo o nível das interferências secundárias menor ou igual ao patamar máximo preestabelecido pela rede primária. Por outro lado, ao contrário do que é permitido ocorrer nos modos *Undelay* e *Overlay*, no modo *Interweave* os acessos secundários só devem acontecer de forma não sobreposta aos primários, ou seja, quando a decisão de ocupação da rede secundária sobre a faixa de interesse for em favor da hipótese \mathcal{H}_0 , significando que no caso ideal, isto é, sem erros de decisão de ocupação, um canal primário só deve ser ocupado com transmissões secundárias se estiver ocioso.

As decisões de ocupação tomadas pela rede secundária sobre a faixa de interesse podem ser obtidas por meio de apenas um SU, no sensoriamento espectral não cooperativo, ou por meio da colaboração de SUs no sensoriamento espectral cooperativo [28]. No primeiro caso esse dado SU deve realizar todas as operações da rede secundária, isto é, sensoriamento, cômputo de T , preestabelecimento de τ , comparação de T com τ , e possível ocupação da faixa desejada caso sua decisão de ocupação seja em favor da hipótese \mathcal{H}_0 ou caso sua operação esteja dentro das restrições de potência preestabelecidas pela rede primária de acordo com os modos de acesso secundário. Porém o sensoriamento espectral não cooperativo possui menor poder estatístico de decisão de ocupação principalmente por problemas de desvanecimentos por múltiplos percursos de propagação, sombreamentos, e problemas de incerteza do receptor [28]. Já no sensoriamento

espectral cooperativo a observação da faixa de interesse é feita por diferentes SUs em diferentes posições geográficas, e isso é o que confere decisões de ocupação (cooperativas) mais precisas que aquelas obtidas no sensoriamento espectral não cooperativo devido à vantagem da diversidade espacial adquirida e consequente mitigação dos efeitos do desvanecimento, sombreamento, e da incerteza do receptor.

A Figura 7 exemplifica os problemas de desvanecimentos multi-percurso, sombreamentos e de incerteza do receptor, e justifica o melhor desempenho das decisões de ocupação tomadas no sensoriamento espectral cooperativo a partir de um cenário de sensoriamento formado por uma rede primária com um transmissor primário, Tx, e dois receptores primários, PU₁ e PU₂, e uma rede secundária com uma estação base, ou BS, e quatro SUs, os SU₁, SU₂, SU₃ e SU₄. Observando a figura, nota-se que em um dado instante de sensoriamento as amostras coletadas pelos SUs 1 e 3 podem estar sob desvanecimento multi-percurso por possíveis reflexões causadas pelo Obstáculo que também bloqueia a chegada do sinal primário até o SU₂. Obviamente, por esse motivo a situação do SU₂ é de sombreamento. Já o SU₄ está localizado fora da área de cobertura da rede primária; logo, sob incerteza do receptor por não ser capaz de perceber o transmissor primário, tampouco os receptores primários. A ocorrência desses fenômenos pode comprometer seriamente as decisões de ocupação no sensoriamento espectral não cooperativo, podendo, por exemplo, fazer com que a faixa de interesse não seja ocupada pelo SU quando poderia ser, portanto limitando a vazão da rede secundária, ou com que a faixa de interesse seja ocupada quando não poderia, portanto causando interferências prejudiciais às transmissões da rede primária. Por outro lado, o sensoriamento espectral cooperativo é capaz de mitigar as influências desses fenômenos sobre as decisões de ocupação aumentando a confiabilidade das decisões tomadas pela rede secundária simplesmente por ser menos provável que todos os SUs em cooperação estejam operando sob um ou mais desses fenômenos ao mesmo tempo em um dado instante de sensoriamento.

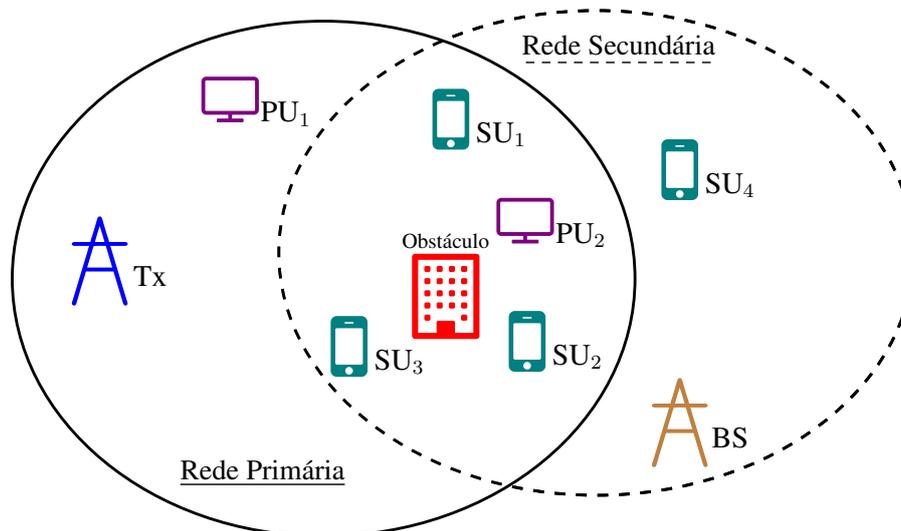


Figura 7: Possíveis cenários de sensoriamento espectral.

O sensoriamento espectral cooperativo pode ser centralizado, assistido por retransmissão, ou distribuído [28], como ilustram as partes (a), (b) e (c) da Figura 8, respectivamente. Observando a figura, veja que o primeiro e o segundo caso pressupõem a adoção de uma central geral de processamento de dados chamada centro de fusão, ou *Fusion Center* (FC). Em ambos os casos as informações de sensoriamento dos SUs são compartilhadas com esse FC via canais de controle

e o FC deve processar todas as informações recebidas, tomar uma decisão de ocupação global sobre a hipótese a qual o canal sob sensoriamento se encontra e informar sobre essa decisão aos SUs via canais de controle a fim de gerenciar as atividades de ocupação da rede secundária. A diferença entre eles é que na abordagem assistida por retransmissão considera-se a possibilidade de determinados canais de controle não estarem em boas condições de reportar informações de sensoriamento ao FC – situação exemplificada pelos canais de controle dos SUs 3 e 4. Sob essa hipótese, as informações de sensoriamento dos SUs cujos respectivos canais de controle estão impossibilitados de estabelecer conexão com o FC são enviadas ao FC através dos canais de controle dos demais SUs. Já o sensoriamento espectral cooperativo do tipo distribuído não leva em conta o uso de um FC e o papel exercido pelo FC nos sensoriamentos centralizado e assistido por retransmissão é assumido por um dos SUs em cooperação. As decisões de ocupação nesse caso são obtidas por meio de interações entre os SUs participantes da cooperação até que uma decisão final seja alcançada.

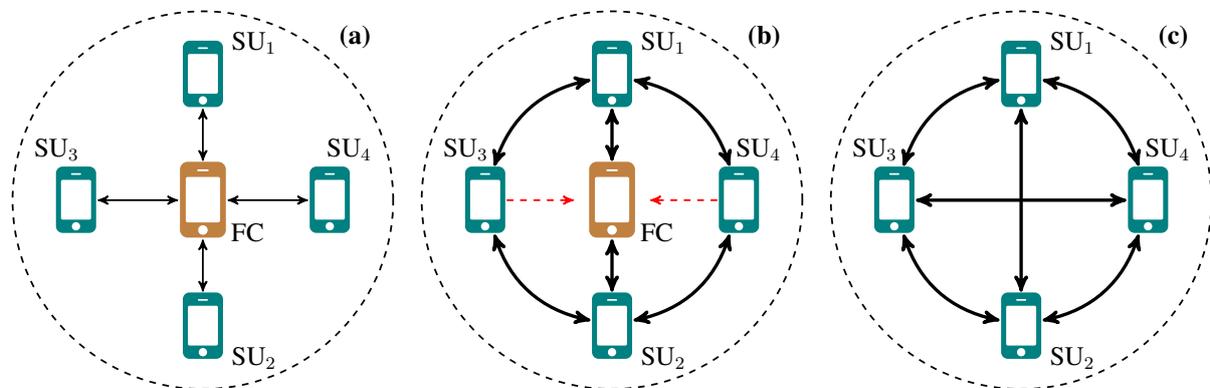


Figura 8: Sensoriamento espectral cooperativo centralizado (a), assistido por retransmissão (b), ou distribuído (c).

No sensoriamento espectral cooperativo centralizado o tipo da informação enviada ao FC define dois tipos de fusão de dados: a fusão de decisão abrupta, ou fusão *Hard Decision* (HD), e a fusão de decisão suave, ou fusão *Soft Decision* (SD) [28]. Na fusão HD as informações enviadas ao FC são decisões de ocupação tomadas local e autonomamente pelos SUs, significando que cada SU em cooperação deve preestabelecer τ , computar T , fazer a comparação $T > \tau$, e alcançar sua própria decisão de ocupação. Recebidas essas decisões locais no FC, o FC deve combiná-las a fim de chegar a uma decisão global final. Essa decisão final é obtida de forma geral pela regra de combinação de decisões conhecida como regra k -em- M , em que k representa no número de decisões locais recebidas em favor da hipótese \mathcal{H}_1 , e M , o número total de decisões recebidas, ou, em outros termos, o número total de SUs em cooperação. Sob essa regra, o FC deve tomar a decisão final de ocupação favorecendo a hipótese \mathcal{H}_1 se pelo menos k das M decisões locais recebidas também forem em favor da hipótese \mathcal{H}_1 , ou favorecendo a hipótese \mathcal{H}_0 caso contrário. Na literatura é comum que se particularize essa regra geral para alguns valores de k , mais especificamente para $k = 1$, $k = \lfloor M/2 + 1 \rfloor$, e $k = M$, em que $\lfloor x \rfloor$ representa o maior valor inteiro menor ou igual a x . Fazendo isso, a regra k -em- M é particularizada respectivamente para as regras de fusão decisão OU, ou *OR*, majoritária, ou *MAJ*, e E, ou *AND*. Então, na regra *OR* é claro que a decisão final de ocupação será em favor da hipótese \mathcal{H}_1 se pelo menos uma das decisões locais recebidas também for a favor dessa hipótese, ou, equivalentemente, a decisão final de ocupação só será em favor da hipótese \mathcal{H}_0 se todas as decisões locais recebidas também forem a favor da hipótese da ausência de sinal na faixa de

interesse. Por isso a regra *OR* é mais conservativa no que diz respeito à interferências da rede secundária sobre a rede primária. Já a regra *AND* é a menos conservativa desse ponto de vista, pois nela a decisão final de ocupação será em favor de \mathcal{H}_1 apenas se todas as decisões recebidas também forem em favor da hipótese \mathcal{H}_1 , ou seja, basta que uma decisão recebida seja em favor da hipótese \mathcal{H}_0 para que a rede secundária decida pela ocupação da faixa primária de interesse. Conforme sua própria definição, na regra *MAJ* a decisão final de ocupação só será em favor da hipótese \mathcal{H}_1 se a maioria das decisões locais recebidas no FC também forem em favor dessa hipótese, sendo, portanto, menos conservativa que a regra *OR*, e mais conservativa que a regra *AND*. Já na fusão SD as informações de sensoriamento enviadas ao FC podem ser as próprias amostras de sensoriamento coletadas do sinal recebido durante o período de observação da faixa de interesse ou alguma quantidade derivada dessas amostras. Quando são as próprias amostras de sensoriamento o FC deve combiná-las de tal forma a computar uma estatística de teste global, compará-la com um limiar de decisão global predefinido, e chegar à decisão final de ocupação. Em contrapartida, considerando a outra opção, cada SU em cooperação deve computar uma estatística de teste parcial e enviar essa quantidade ao FC, que por sua vez obterá a estatística de teste global combinando todas as informações recebidas e chegará à decisão final de ocupação comparando-a com o limiar de decisão global predefinido.

Há um grande número de testes estatísticos projetados para o cômputo da estatística de teste T em diferentes circunstâncias e cenários específicos de sensoriamento espectral disponíveis na literatura [38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46] – cada um com suas vantagens e desvantagens – porém existem apenas três categorias relacionadas à possíveis conhecimentos *a priori* requeridos para o cômputo da estatística de teste nas quais eles se encaixam: i) a categoria dos testes estatísticos não-cegos, ii) a categoria dos testes estatísticos semicegos, e iii), a categoria dos testes estatísticos cegos. Os testes estatísticos não-cegos são aqueles nos quais o cômputo da estatística de teste requer conhecimentos *a priori* sobre o sinal alvo de sensoriamento, podendo ser suas propriedades cicloestacionárias, formato de pulso e tipo de modulação, sobre a resposta ao impulso dos canais de sensoriamento, formados entre PUs e SUs, e/ou sobre a variância do ruído aditivo Gaussiano branco, ou *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), nas entradas dos SUs. Os exemplos mais conhecidos dessa categoria são o teste denominado detecção por propriedades cicloestacionárias, ou *Cyclostationary Feature Detection* (CFD), e o teste denominado detecção por filtro casado, ou *Matched-Filter Detection* (MFD) [38, 45, 46]. Por outro lado, os testes estatísticos semicegos são aqueles que geralmente só necessitam da informação da variância do ruído presente nas entradas dos SUs. Os exemplos mais conhecidos dessa categoria são o teste baseado nos autovalores da matriz de covariância das amostras do sinal recebido coletadas durante o período de sensoriamento, denominado detecção por máximo autovalor, ou *Maximum Eigenvalue Detection* (MED), e a detecção de energia, ou *Energy Detection* (ED), cuja estatística de teste também pode ser computada a partir dos autovalores dessa matriz de covariância [42]. Já no que diz respeito aos testes estatísticos cegos, eles são aqueles nos quais nenhuma informação *a priori* sobre sinal alvo de sensoriamento ou ruído é requerida para o cômputo da estatística de teste. Eles são comumente baseados nos elementos da matriz de covariância das amostras do sinal recebido [43] ou nos autovalores dessa matriz [42, 47], mas alguns também se baseiam na densidade espectral de potência, ou *Power Spectral Density* (PSD), dessas amostras do sinal recebido [44]. Nessa categoria pode-se destacar, respectivamente, a detecção baseada no teste invariante de maior potência local, ou *Locally Most Powerful Invariant Test* (LMPIT) [42], a detecção baseada na razão de Hadamard, ou *Hadamard Ratio Detector* (HRD) [47], a detecção pela razão entre máximo e mínimo autovalores, ou *Maximum-Minimum Eigenvalue Detection* (MMED), e a detecção pelo

teste de máxima verossimilhança generalizado, ou *Generalized Likelihood Ratio Test* (GLRT), [42], e a detecção baseada no cancelamento cooperativo da potência de ruído por partição da PSD, ou *Cooperative Power Spectral Density Split Cancellation* (CPSC) [44].

As técnicas de sensoriamento, ou estatísticas de teste, também podem ser classificadas em função da largura de faixa com as quais se pode monitorar. Nesse quesito elas podem ser classificadas como técnicas de sensoriamento de banda estreita e técnicas de sensoriamento de banda larga. As técnicas de sensoriamento de banda estreita permitem monitorar apenas uma faixa espectral por vez, e a ocupação secundária também é efetuada por meio de apenas um SU por vez. Já as técnicas de sensoriamento de banda larga permitem monitorar mais de uma faixa espectral simultânea ou sequencialmente, e a ocupação secundária nesse caso pode acontecer para mais de um SU conjuntamente. A Tabela 10 mostra os exemplos mais comuns classificados dessa forma, de onde pode-se notar que a ED e as técnicas de detecção baseadas nos autovalores da matriz de covariância das amostras do sinal recebido podem ser aplicadas tanto no sensoriamento de banda larga quanto no de banda estreita. A técnica de detecção pela transformada de *wavelet* [48] e a técnica *compressive sensing* [49] também se encaixam na categoria de técnicas cegas de detecção.

Tabela 10: Classificação de técnicas de sensoriamento espectral em função da largura de banda com as quais se pode monitorar.

Técnicas de sensoriamento de banda larga	Técnicas de sensoriamento de banda estreita
ED	ED
Detecção por transformada de <i>wavelet</i>	MFD
Detecção pela técnica <i>compressive sensing</i>	CFD
MED, MMED, GLRT	MED, MMED, GLRT

Com base em todos os conceitos e técnicas de sensoriamento espectral apresentados nesta seção, pode-se notar que existem uma boa quantidade de abordagens que podem ser adotadas no uso combinado de banco de dados de geolocalização e sensoriamento espectral objetivando configurar o melhor cenário para a exploração de TVWSs nas áreas remotas e rurais com o propósito de estabelecer harmoniosa coexistência entres os sistemas primários de secundários de comunicação sem fio. Além disso, de forma mais específica todos esses conceitos e técnicas de sensoriamento espectral evidenciam diversas possibilidades de novas implementações a fim de se alcançar melhorias e evoluções para essa aplicação no transceptor Brasil 6G.

4 Suporte ao uso secundário do espectro utilizando tecnologia TVWS

Carlos F. M. e Silva, Edilson Filho, Lucas Cordeiro, Rodrigo Cavalcanti, Thiago Nóbrega, e Wilker Feitosa.

cfms@gtel.ufc.br, edilsonfilho@lesc.ufc.br, lucascordeiro@alu.ufc.br, rodrigo@gtel.ufc.br, thiagonobrega@gmail.com, wilker@gtel.ufc.br

Por ser um país de dimensões continentais, o Brasil apresenta problemas relacionados à fraca cobertura de sinal para comunicação fixa sem fio e móvel celular fornecida pelas operadoras tradicionais. Como consequência há uma significativa proporção de habitantes sem conectividade ou com conectividade limítrofe à Internet. A situação é mais grave nas áreas afastadas dos grandes centros. Os problemas de acesso à Internet e às comunicações móveis são barreiras que levam os indivíduos que vivem em regiões remotas e rurais a permanecerem excluídos digitalmente. Além disso, o custo da infraestrutura de rede é um fator limitante para a inclusão digital no Brasil considerando a renda das camadas mais desfavorecidas da população. A tecnologia TVWS pode ser utilizada como alternativa para exploração do espectro de TV como infraestrutura para a implantação do acesso à Internet com menor custo de investimento. Para as referidas regiões e camadas populacionais o custo da assinatura do serviço é fator essencial para democratizar o acesso de qualidade à rede mundial.

Existem diversos fatores que fazem com que a exploração comercial do TVWS no Brasil seja um desafio. Destacamos a seguir três desses fatores. O primeiro é a regulamentação. Neste sentido a ANATEL deu um importante passo ao regulamentar recentemente a utilização do TVWS no Brasil. O segundo envolve a disponibilização de terminais de usuário para banda larga sem fio fixa utilizando as faixas de frequência de TV. Visando a inclusão digital, tais terminais devem ter baixo custo. O terceiro, que será o foco principal desta seção, é que, seja qual for a solução tecnológica e regulatória adotada no Brasil, todas partem de uma premissa simples: a existência de informação sobre o mapeamento, por localidade, do espectro disponível (canais de rádio) para a operação em caráter secundário (via TVWS) com as devidas margens de segurança estatística que garantam a continuidade do serviço primário (nomeadamente, a Televisão Digital Aberta (TVDA)) e do serviço secundário (acesso em banda larga à Internet). Isto pode ser viabilizado através da disponibilização de uma base de dados online. Esta base de dados é vista como a garantidora da coexistência dos sistemas primários e secundários, mesmo em caso de ausência ou falha de uma funcionalidade de sensoriamento automático de espectro, eventualmente disponível em alguns rádios. Desta forma, fica garantida a limitação de possível interferência dos sistemas secundários nos primários.

4.1 Requisitos para a base de dados

A base de dados é o meio de gestão do sistema secundário, permitindo que os canais de TVWS sejam reservados e liberados por usuários secundários atendendo a critérios objetivos de garantia de não interferência, não somente com os sistemas primários, mas também com outros sistemas secundários operando na mesma região. Esta funcionalidade, por sua vez, sugere a existência de um *broker* (negociante) de espectro, entidade cuja formatação também precisará ser alcançada pela regulação.

Além da consulta à disponibilidade de espectro em si, a base de dados pode fornecer a estimativa de QoS disponível (taxas de *download* e *upload*) de acordo com a tecnologia de

acesso adotada, estabelecimento de prioridades, limitante superior de potência radiada por canal, etc.. Tais previsões são feitas através de modelos estatísticos amplamente validados na literatura técnica.

Para garantir compatibilidade atual e futura com dispositivos de TVWS fabricados em qualquer parte do mundo, a base de dados deve estar em conformidade com as especificações da *Internet Engineering Task Force* (IETF), especificamente a RFC 7545: *Protocol to Access White-Space (PAWS) Databases*.

Além dos requisitos acima, comuns para quaisquer bases de dados de TVWS, diferentes abordagens de implantação podem ser comparadas considerando ao menos quatro indicadores de desempenho:

- Eficiência;
- Privacidade;
- Segurança;
- Custo operacional.

A eficiência do sistema refere-se a quão bem o sistema executa sua função pretendida, neste caso, gerenciar e analisar dados. Este aspecto considera fatores como o tempo de resposta. Sendo este um critério extremamente importante em países com dimensões continentais, como é o Brasil. A privacidade de dados refere-se à proteção de dados confidenciais e à compatibilidade do sistema com as leis de proteção de dados em vigor. O aspecto de segurança refere-se à proteção do sistema contra usuários mal-intencionados (por exemplo, acesso, uso ou modificação não autorizados). Como exemplo de uso mal-intencionado um agente pode solicitar a reserva ou provocar a liberação de todo o espectro de rádio de TVWS em uma dada região. Finalmente, o custo operacional e de implantação refere-se ao custo total de implementação e manutenção o sistema. Este aspecto considera fatores como custos de hardware e software, pessoal, custos de manutenção contínua e custos de suporte.

Por fim uma característica desejável para a base de dados de TVWS é que a mesma seja descentralizada, isto é, que não haja um único ponto de falha ou uma única autoridade que tenha sua guarda. Por exemplo, advogamos que seja utilizada uma tecnologia do tipo *Blockchain* criando um mecanismo avançado de banco de dados que permite o compartilhamento transparente e imutável de informações. Desta forma um grupo de provedores de Internet poderia administrar coletivamente a base de dados, incentivando a governança compartilhada e criando a devida transparência para que a Agência Reguladora e o público em geral possam acompanhar a forma de emprego do espectro secundário.

4.2 Cenários de implantação da base de dados de TVWS

Apresentamos a seguir três possíveis cenários de implantação de um banco de dados de TVWS e comparamos suas vantagens e desvantagens.

4.2.1 Implantação com autoridade única centralizada

Esta abordagem pode ser considerada a mais simples na qual uma única autoridade implanta e gerencia a base de dados em sua própria infraestrutura de *data center*. Esta solução favorece a estabilidade do sistema em vista de que toda a informação é gerenciada através de uma única

instância. Por outro lado, questões como segurança e privacidade podem ser comprometidas se esta única Autoridade responsável falhar em proteger o acesso e integridade dos dados. O custo de manutenção da base de dados tende a ser alto para a Autoridade única, em vista que não haverá possibilidade de compartilhar os custos de operação com outros atores.

4.2.2 Implantação com descentralização parcial

A segunda forma de implantação representa um passo na direção de descentralização da operação da base de dados. Neste caso propõe-se que a autenticação de usuários seja feita pelo próprio provedor de serviço de Internet de forma descentralizada. Desta forma, informações sensíveis dos usuários permanecerão na base de dados de cada provedor e não será necessário compartilhá-los com a Autoridade que gerencia os demais módulos da base de dados de TVWS. Note, porém, que a maior parte das operações da base de dados continuam centralizadas em uma única Autoridade.

4.2.3 Implantação com descentralização total

Em sua versão mais agressiva em termos de descentralização, a base de dados de TVWS irá utilizar todo o potencial da tecnologia *Blockchain* e ser co-gerenciada por um conjunto de atores que são partes interessadas do ecossistema de TVWS, ou seja, por um conjunto de provedores e pela própria Agência Reguladora, além de outros representantes, como por exemplo um representante da comunidade que fale pelos clientes finais beneficiados pela tecnologia. Trata-se efetivamente da formação de um consórcio de gestão baseado em *Blockchain*. A integridade e transparência dos dados é máxima nesta opção em vista da própria natureza de descentralização, autocorreção e imutabilidade inerente à tecnologia *Blockchain*. O tempo de resposta para a plena sincronização das informações dependerá do número de nós envolvidos no sistema e neste sentido esta opção é menos vantajosa que o caso totalmente centralizado. Porém, em nossa visão, as vantagens em segurança, privacidade e compartilhamento de custos serão mais relevantes e superarão eventual perda de eficiência temporal (tempo de resposta) para a maioria dos provedores de acesso à Internet interessados em utilizar TVWS.

4.3 Proposta de arquitetura descentralizada

Partindo do conceito de base de dados descentralizada acima exposto, propomos o seguinte arcabouço para a implantação de uma base de dados de TVWS no contexto da evolução dos serviços de provimento de acesso à Internet banda larga a baixo custo. Para atingir esse objetivo, propomos o emprego da tecnologia *Blockchain* conforme exposto acima. A base de dados de TVWS ora proposta será composta por quatro módulos:

M1 Módulo de Gestão do Espectro;

M2 Módulo de Comunicação;

M3 Módulo de Integração de Dados;

M4 Módulo de Propagação.

Existem dois grupos de módulos: públicos e privados. Os módulos públicos são M1 e M2 e são visíveis e usados pelos usuários (por exemplo, um provedor de Internet que utiliza TVWS como infraestrutura). Por outro lado, os módulos privados M3 e M4 são invisíveis para os

usuários e operados apenas pelos reguladores: a ANATEL, no caso do Brasil, e possivelmente o negociador ou *broker* instituído pela regulação.

O módulo M1 responde a perguntas sobre a disponibilidade de espectro por localidade, assim como gerencia os usuários do sistema enquanto impõem limites e restrições ao uso secundário do espectro. Por exemplo, M1 responderá à consulta de um dispositivo TVWS sobre quais faixas de espectro estão disponíveis em uma determinada localidade e por quanto tempo. Em outras palavras, M1 é responsável por definir se os dispositivos TVWS podem usar determinadas frequências disponíveis em uma dada localidade, garantindo que não interfiram com qualquer transmissão de TV existente.

Considerando o uso da tecnologia *Blockchain*, M1 deve ser projetado como um aplicativo descentralizado e, além disso, realizar alocação de espectro e operações regulatórias de forma transparente, auditável e confiável. Portanto, M1 deve permitir a auditabilidade de todas as transações (operações) realizada no sistema.

O Módulo M2 representa a via de comunicação entre os dispositivos TVWS e o módulo M1. Trata-se efetivamente de uma *Application Programming Interface* (API) que expõe aos dispositivos de terceiros duas funções principais:

- Fornece autenticação e autorização local para os usuários TVWS e
- Traduz as mensagens da RFC 7545 para comandos *Blockchain* que precisam ser processados pelo módulo M1 (que gerencia o banco de dados propriamente dito).

O módulo M3 coleta e processa dados de uso de espectro de TV a partir de bancos de dados oficiais disponibilizados pela Agência Reguladora. No Brasil a ANATEL disponibiliza o Mosaico, banco de dados que dentre outras informações permite a geolocalização dos transmissores de TV assim como suas características de rádio frequência (canal, potência de transmissão, padrão de radiação das antenas, etc.). Essas informações são encaminhadas ao módulo M4.

O módulo M4 é responsável por computar métricas críticas de propagação e interferência para garantir a correta coexistência entre o TVWS e os sistemas de transmissão de TV. Esse módulo realiza previsão de disponibilidade georreferenciada de espectro a partir do emprego de modelos estatísticos de propagação de sinal de rádio, validados na literatura técnica. Este módulo pode também eventualmente incorporar medidas de monitoramento espectral integradas pelo módulo M3 como forma de aperfeiçoar as previsões dos modelos.

Convém ressaltar que o TVWS pode ser encarado como o sub-produto da implementação de uma rede de difusão do sinal de TV digital nas bandas VHF UHF onde é limitada a interferência entre transmissores vizinhos. Daí que os mesmos princípios para o uso dos TVWSs, descritos anteriormente, são aplicáveis em outras faixas de frequência, onde o espectro eletromagnético é parcialmente usado por sistemas primários.

5 Conclusão

O transceptor Brasil 6G foi concebido visando atender a demanda nacional de conectividade em áreas remotas e rurais e visando suportar diferentes tecnologias e diferentes casos de uso. Para viabilização destes suportes, foi especificada uma estrutura de quadro de transmissão flexível e versátil. A organização desta estrutura, bem como os parâmetros de operação contemplados foram apresentados ao longo deste relatório.

O transceptor Brasil 6G foi desenvolvido, a princípio, para ocupar canais do espectro de TV que se encontram desocupados, caracterizando, assim, o mesmo como sendo um sistema de TVWS. O presente relatório apresentou uma introdução à regulamentação atualmente aplicável aos sistemas de TVWS no Brasil. Foram apresentadas também técnicas de sensoriamento espectral que podem ser empregadas por sistemas de TVWS para identificação dos canais livres e ocupados no espectro.

O relatório apresentou também as motivações e a necessidade para a concepção e implantação de uma base de dados de informações de canais livres de TV como parte inerente da tecnologia TVWS. Foram apresentados os principais requisitos que devem ser observados na especificação de tal base de dados e foi proposta uma arquitetura de alto nível composta por 4 módulos funcionais. Por fim, 3 cenários de implantação da base de dados foram analisados com variados graus de benefício em termos de segurança, privacidade, custo e eficiência. Pode-se concluir inicialmente que uma implantação totalmente descentralizada com uso da tecnologia *Blockchain* é uma alternativa de implementação que está alinhada com o interesse público de governança compartilhada e transparência de informações, além de apresentar vantagem técnica na maioria dos requisitos em comparação com as alternativas centralizadas ou semi-centralizadas.

Pode-se concluir a partir do conteúdo descrito que a estrutura de quadro concebida para o transceptor Brasil 6G é bastante flexível e completa. Que há uma legislação aplicável aos sistemas de TVWS no Brasil que limita sua potência de transmissão e que também determina que as informações dos bancos de dados de geolocalização devem ser públicas, conter a ocupação dos canais de VHF e UHF. Pode-se concluir ainda que técnicas de sensoriamento espectral associadas ao emprego de base de dados, que podem ser implantadas utilizando diferentes arquiteturas, são ferramentas base para a implementação de novos serviços de TVWS.

Referências

- [1] 5G-RANGE, “Deliverable 3.2 physical layer of the 5G-RANGE – part ii,” Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c1bc5112&appId=PPGMS>, acesso em: 15 julho, 2023.
- [2] E. Biglieri, J. Proakis, e S. Shamai, “Fading channels: information-theoretic and communications aspects,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 44, n. 6, p. 2619–2692, 1998.
- [3] A. R. S. Bahai e B. R. Saltzberg, *Multi-Carrier Digital Communications*. Springer US, 1999. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1007%2Fb117709>
- [4] S. Pejoski e V. Kafedziski, “Estimation of sparse time dispersive channels in pilot aided OFDM using atomic norm,” *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 4, n. 4, p. 397–400, 2015.
- [5] 3GPP, “Tr 38.901, study on channel model for frequency form 0.5 to 100 GHz,” 2017, acesso em: 15 julho, 2023.
- [6] Q. T. Zhang e S. H. Song, “Exact expression for the coherence bandwidth of Rayleigh fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, v. 55, n. 7, p. 1296–1299, 2007.
- [7] S. H. Hwang, J. S. Um, M. S. Song, C. J. Kim, H. R. Park, e Y. H. Kim, “Design and verification of IEEE 802.22 WRAN physical layer,” in *2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)*, 2008, p. 1–6.
- [8] 5G-RANGE, “D2.1 application and requirements report,” Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c1eec3b3&appId=PPGMS>, acesso em: 11 julho, 2023.
- [9] D. Chu, “Polyphase codes with good periodic correlation properties (corresp.),” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 18, n. 4, p. 531–532, 1972.
- [10] ABNT NBR, “Norma ABNT NBR 15601 - Televisão digital terrestre — Sistema de transmissão.” 2020.
- [11] A. F. M. Shahen Shah, “A survey from 1G to 5G including the advent of 6G: Architectures, multiple access techniques, and emerging technologies,” in *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2022, p. 1117–1123.
- [12] L. Chettri e R. Bera, “A comprehensive survey on Internet of things (IoT) toward 5G wireless systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 1, p. 16–32, 2020.
- [13] G. Pavan, V. N. Reddy, A. R. Prasad, R. R. Chintala, e N. R. Sai, “A comprehensive survey on recent advances in 5G networks and mobile systems,” in *2023 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. IEEE, 2023, p. 949–953.

- [14] A. Chaoub, M. Giordani, B. Lall, V. Bhatia, A. Kliks, L. Mendes, K. Rabie, H. Saarnisaari, A. Singhal, N. Zhang, S. Dixit, e M. Zorzi, “6G for bridging the digital divide: Wireless connectivity to remote areas,” *IEEE Wireless Communications*, v. 29, n. 1, p. 160–168, 2022.
- [15] Y. Zhao, W. Zhai, J. Zhao, T. Zhang, S. Sun, D. Niyato, e K.-Y. Lam, “A comprehensive survey of 6G wireless communications,” *arXiv preprint arXiv:2101.03889*, 2020.
- [16] J. M. C. Brito, L. L. Mendes, e J. G. S. Gontijo, “Brazil 6G project - an approach to build a national-wise framework for 6G networks,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, p. 1–5.
- [17] M. Denkovska, P. Latkoski, e L. Gavrilovska, “Geolocation database approach for secondary spectrum usage of TVWS,” in *2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers*, 2011, p. 369–372.
- [18] S. Wandale, G. Taulo, D. Kondwani, P. Musivapo, e C. Mikeka, “Impact of analogue switch-off on availability of TVWS: A quantitative assessment,” in *2020 IEEE 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET)*, 2020, p. 28–31.
- [19] Y. C. Burbano e H. P. Penagos, “TV white spaces in smart grids: Case study in La Guajira,” in *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, 2021, p. 1–6.
- [20] H. M. Hussien, K. Katzis, L. P. Mfupe, e E. T. Bekele, “Coexistence of TV white space devices and DTV services in Ethiopian geolocation white space spectrum database,” in *2019 IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2019, p. 1–5.
- [21] Y. A. Adediran, O. Kolade, N. Faruk, N. T. Surajudeen-Bakinde, A. A. Ayeni, e O. W. Bello, “TV white space in Nigeria in UHF band: Geo-spatial approach,” in *2014 IEEE 6th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 2014, p. 1–6.
- [22] H. Sawada, T. Kan, K. Mizutani, K. Ishizu, H. Murakami, e H. Harada, “Propagation measurement for TVWS interference evaluation,” in *2014 Asia-Pacific Microwave Conf.*, 2014, p. 1378–1380.
- [23] M. Deshmukh, K. Patif, F. Frederiksen, K. Skouby, e R. Prasad, “Wireless broadband network on TVWS for rural areas: An Indian perspective,” in *2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2013, p. 1–5.
- [24] D. Chi Hieu e P. Van Tien, “Assessment of TV white space in Vietnam,” in *2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*, 2014, p. 637–640.
- [25] M. T. Masonta, T. M. Ramoroka, e A. A. Lysko, “Using TV white spaces and e-learning in South African rural schools,” in *2015 IST-Africa Conference*, 2015, p. 1–12.
- [26] D. O. da União. Resolução Anatel N° 747, de 5 de outubro de 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anatel-n-747-de-5-de-outubro-de-2021-350609897>

- [27] M. M. Buddhikot, “Understanding dynamic spectrum access: Models, taxonomy and challenges,” in *2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2007, p. 649–663.
- [28] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, e R. Balakrishnan, “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey,” *Physical Communication*, v. 4, n. 1, p. 40–62, 2011.
- [29] J. Vartiainen, M. Matinmikko-Blue, H. Karvonen, L. Mendes, A. Matos, e C. Silva, “Performance of WIBA energy detector in rural and remote area channel,” in *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2019, p. 48–52.
- [30] W. Dias, A. Ferreira, R. Kagami, J. S. Ferreira, D. Silva, e L. Mendes, “5G-RANGE: A transceiver for remote areas based on software-defined radio,” in *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2020, p. 100–104.
- [31] A. M. Cavalcante, M. V. Marquezini, L. Mendes, e C. S. Moreno, “5G for remote areas: Challenges, opportunities and business modeling for Brazil,” *IEEE Access*, v. 9, p. 10 829–10 843, 2021.
- [32] I. T. Union. (2022) About International Telecommunication Union. [Online]. Disponível em: <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>
- [33] U. Nations. (2022) About the United Nations. [Online]. Disponível em: <https://www.un.org/en/>
- [34] A. N. de Telecomunicações. (2023) Radiofrequência. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiofrequencia>
- [35] S. K. Sharma, T. E. Bogale, S. Chatzinotas, B. Ottersten, L. B. Le, e X. Wang, “Cognitive radio techniques under practical imperfections: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 1858–1884, Fourthquarter 2015.
- [36] A. Ali e W. Hamouda, “Advances on spectrum sensing for cognitive radio networks: Theory and applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 1277–1304, 2017.
- [37] A. Nasser, H. Al Haj Hassan, J. Abou Chaaya, A. Mansour, e K.-C. Yao, “Spectrum sensing for cognitive radio: Recent advances and future challenge,” *Sensors*, v. 21, n. 7, 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/7/2408>
- [38] T. Yucek e H. Arslan, “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 11, n. 1, p. 116–130, 2009.
- [39] A. Taherpour, M. Nasiri-Kenari, e S. Gazor, “Multiple antenna spectrum sensing in cognitive radios,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 9, n. 2, p. 814–823, 2010.
- [40] R. López-Valcarce, G. Vazquez-Vilar, e J. Sala, “Multiantenna spectrum sensing for cognitive radio: overcoming noise uncertainty,” in *2010 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing*, 2010, p. 310–315.

- [41] J. K. Tugnait, “Multiple antenna spectrum sensing for cognitive radios in unknown noise,” in *2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2011, p. 431–435.
- [42] B. Nadler, F. Penna, e R. Garello, “Performance of eigenvalue-based signal detectors with known and unknown noise level,” in *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011, p. 1–5.
- [43] D. Ramirez, J. Via, I. Santamaria, e L. L. Scharf, “Locally most powerful invariant tests for correlation and sphericity of Gaussian vectors,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 59, n. 4, p. 2128–2141, 2013.
- [44] R. Gao, Z. Li, P. Qi, e H. Li, “A robust cooperative spectrum sensing method in cognitive radio networks,” *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 11, p. 1987–1990, 2014.
- [45] K. B. Letaief e W. Zhang, “Cooperative communications for cognitive radio networks,” *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 5, p. 878–893, 2009.
- [46] B. Wang e K. R. Liu, “Advances in cognitive radio networks: A survey,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 5, n. 1, p. 5–23, 2011.
- [47] S. Sedighi, A. Taherpour, J. Sala-Alvarez, e T. Khattab, “On the performance of Hadamard ratio detector-based spectrum sensing for cognitive radios,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 63, n. 14, p. 3809–3824, 2015.
- [48] Z. Tian e G. B. Giannakis, “A Wavelet approach to wideband spectrum sensing for cognitive radios,” in *2006 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, 2006, p. 1–5.
- [49] U. Satija e P. De, “Compressed sensing based blind spectrum sensing in cognitive radio,” in *2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2015, p. 275–279.