

Análise do Uso de TVWS no Brasil

Nicole Souza e Jose Marcos C. Brito

Resumo— As técnicas de compartilhamento de espectro têm o objetivo de permitir um acesso mais dinâmico ao espectro, garantindo uma melhor eficiência de utilização. Uma dessas abordagens é o TVWS (*TV White Space*), que permite que canais de TV não utilizados nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) sejam aproveitados por sistemas secundários, sem causar interferências nos canais de televisão adjacentes. Este artigo explora o uso de TVWS para prover acesso dinâmico ao espectro. Realizamos uma análise dessa técnica aplicada ao contexto brasileiro, discutindo os benefícios, desafios e a regulamentação vigente no país, além da disponibilidade de espectro para os canais de TV. Adicionalmente, investigamos o potencial de utilização deste espectro na implantação da tecnologia 5G NR em municípios que preenchem os critérios necessários. Para tal, utilizamos uma abordagem que faz uso das infraestruturas de torres de TV para implementar a rede de TVWS.

Palavras-Chave— TVWS, *Spectrum Sharing*, *Análise de Cobertura*

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, numerosos estudos investigaram a eficiência da utilização do espectro. Os resultados revelam consistentemente que certas porções do espectro, atribuídas com direitos de utilização exclusivos, não estão sendo utilizadas com todo o seu potencial [1]. Portanto, um esquema adequado de gestão de recursos do espectro é essencial para lidar com a limitação desses recursos, acomodar novas aplicações em redes futuras (como o 6G) e melhorar o desempenho dessas redes [2].

Consequentemente, surgiram modelos de compartilhamento de espectro, com o objetivo de permitir um acesso dinâmico ao espectro [1]. Uma dessas abordagens é o TVWS (*TV White Space*), que permite que canais de TV não utilizados nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) sejam aproveitados por sistemas secundários, sem causar interferências nos canais de televisão.

No contexto do Brasil, a Anatel está analisando a viabilidade e as regulamentações específicas para o uso desse espectro. As características de propagação na faixa de VHF/UHF tornam-na ideal para uso em áreas rurais, onde há maior falta de cobertura em comparação às áreas urbanas [3].

Este artigo analisa a implementação da tecnologia de TVWS no Brasil, abordando aspectos regulatórios, benefícios, desafios e a disponibilidade de canais vagos. Além disso, investiga uma possível implementação do 5G NR, utilizando os canais vagos que atendem os critérios necessários e a infraestrutura de torres de TV existentes. O objetivo é compreender como essa tecnologia pode apoiar o cenário de telecomunicações no país, contribuindo para uma melhor gestão do espectro e ampliando o acesso à conectividade.

Nicole Souza, Inatel. Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: nicole@inatel.br;
Jose Marcos C. Brito, Inatel. Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: brito@inatel.br.

A estrutura deste artigo está organizada da seguinte forma: a Seção II descreve a arquitetura do TVWS. A Seção III analisa uma possível implementação do TVWS no Brasil, incluindo benefícios, desafios, disponibilidade de canais vagos e os ganhos de cobertura com diferentes implementações. A Seção IV conclui este artigo e sugere trabalhos futuros.

II. TV WHITE SPACES

O princípio básico do TVWS é permitir que usuários secundários não licenciados acessem o espectro em localizações geográficas específicas e/ou durante intervalos de tempo específicos, garantindo que essa utilização não interfira na transmissão ou recepção dos serviços primários, neste caso os sistemas de TV.

Para utilizar o TVWS, existem duas abordagens principais. A primeira é o sensoriamento, que utiliza rádio cognitivo para detectar o espectro não utilizado. A segunda abordagem é o Banco de Dados de Geolocalização (GLDB – *Geolocation Data Base*), onde um banco de dados utiliza a localização de um Dispositivo de White Space (WSD – *White Space Device*) para determinar quais canais de TV, se houver, estão vagos naquele local e que podem ser usados pelo WSD [4].

A. Sensoriamento

O Sensoriamento do Espectro é um método que analisa o espectro de forma cíclica para identificar transmissores primários, com o objetivo específico de proteger os sistemas primários, evitando interferência nos seus receptores. Essa técnica habilita os WSDs a detectarem a presença de sinais de TV, proporcionando uma solução inteligente, adaptável e distribuída para identificar as faixas ociosas do espectro [5].

B. Banco de Dados de Geolocalização

A abordagem GLDB pode ser utilizada com ou sem o sensoriamento do espectro. Os canais de TV digital licenciados (DTV – *Digital Television*) são um sistema com alocação de espectro fixa e, por isso, um banco de dados com mapas de localizações de disponibilidades para uso do TVWS pode ser implementado, incluindo a potência permitida para uso secundário.

Nesta abordagem, os WSDs obtêm os canais de TV disponíveis consultando um GLDB certificado, ao invés de detectar o ambiente espectral local. Devido a isso, o GLDB precisa atualizar periodicamente as informações sobre a disponibilidade de canais para uso do TVWS. O procedimento é o descrito a seguir: os WSDs primeiro reportam suas localizações a um GLDB; em seguida, o banco de dados calcula e retorna quais canais de TV disponíveis que os WSDs podem usar em um determinado período de tempo, sem causar prejuízos aos serviços primários. A interferência entre WSDs depende da arquitetura adotada, existindo mecanismos que permitem que os WSDs evitem situações de interferência, chamados "mecanismos de coexistência"[6].

III. ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DO TVWS NO BRASIL

Com o intuito de fundamentar uma futura introdução do TVWS no Brasil, esta seção dedica-se à análise de sua potencial implementação no país. Nesse contexto, discutiremos os aspectos regulatórios relacionados à técnica e os principais benefícios e desafios enfrentados. Além disso, exploraremos a disponibilidade e a utilização eficaz dos canais desocupados nas bandas de UHF e VHF, fundamentais para a operacionalização do TVWS.

A. Regulamento

No Brasil, a Anatel aprovou o regulamento de uso dos White Spaces por meio da Resolução Anatel nº 747, em 05/10/2021. Esse regulamento atribui e destina faixas de radiofrequências em VHF e UHF para o Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC), o Serviço de Comunicação Multimídia (SCM) e o Serviço Limitado Privado (SLP) [10].

Essas faixas de frequências são destinadas em caráter secundário, ou seja, sem exclusividade, para esses serviços, permitindo a utilização dos espaços ociosos do espectro para a prestação de serviços de comunicação em banda larga [10].

O regulamento de uso dos White Spaces, aprovado pela Anatel por meio da Resolução nº 747, traz algumas definições importantes para o entendimento do modelo de compartilhamento de espectro:

- O termo "Espectro Ocioso" ou "White Spaces" refere-se a faixas de radiofrequências que não estão efetivamente utilizadas em uma determinada localidade e período de tempo pelo serviço para o qual foram destinadas.
- Os "Dispositivos de Espectro Ocioso" (White Spaces Devices) são equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita capazes de transmitir ou receber sinais nessas faixas ociosas de espectro, seguindo parâmetros estabelecidos pela base de dados de geolocalização.
- A "Base de Dados de Geolocalização" é um sistema de banco de dados que contém informações sobre os serviços autorizados a operar nas faixas de radiofrequências aprovadas para uso pelos WSDs, cuja capacidade é determinar e fornecer aos dispositivos as radiofrequências disponíveis em uma determinada localidade, garantindo a eficiente gestão do espectro.
- O "Sensoriamento de frequências" é um método utilizado pelos Dispositivos de Espectro Ocioso para monitorar as faixas de radiofrequências e detectar a ausência de outros sinais transmitidos na frequência em que pretendem operar, evitando interferências prejudiciais.

Conforme estabelecido no regulamento, as seguintes faixas de frequências foram atribuídas para uso secundário de Dispositivos de Espectro Ociosos:

- I - faixa de 54 MHz a 72 MHz;
- II - faixa de 174 MHz a 216 MHz;
- III - faixa de 470 MHz a 608 MHz; e
- IV - faixa de 614 MHz a 698 MHz.

Essas faixas são compostas por canais de radiodifusão com largura de faixa de 6 MHz cada [10].

Os critérios para o uso dos blocos de frequências são definidos por um Ato regulatório específico, levando em consideração o uso atual e futuro dos sistemas que operam nessas faixas [10].

Para garantir a proteção dos demais sistemas que operam nessas faixas de radiofrequências, os WSDs devem utilizar o método baseado em GLDB, que, como mencionado, é responsável por identificar os blocos de radiofrequências disponíveis em cada localidade.

As informações da base de dados devem ser públicas e refletir a ocupação atual dos blocos, tanto pelos canais dos serviços de radiodifusão existentes quanto pelos WSDs em operação. Essas medidas são fundamentais para garantir um compartilhamento eficiente e sem interferências do espectro de radiofrequência.

Além disso, o uso adicional do método baseado em "sensoriamento de frequências" pode ser exigido pela Anatel, visando detectar a ausência de outros sinais transmitidos na frequência que o dispositivo pretende utilizar [10].

A administração da "Base de Dados de Geolocalização" poderá ser designada a uma ou mais entidades, públicas ou privadas, conforme definido pela Anatel.

O regulamento também estabelece requisitos técnicos, como a potência efetiva isotropicamente radiada (EIRP - *equivalent isotropically radiated power*) dos dispositivos de espectro ocioso, que deve ser a mínima necessária para a realização do serviço com boa qualidade e adequada confiabilidade. A potência de pico máxima na saída do transmissor não pode exceder 1 Watt [10].

B. Benefícios e Desafios

O uso do TVWS apresenta várias vantagens significativas, especialmente em áreas rurais e remotas, onde a conectividade pode ser um desafio. Algumas das principais vantagens do TVWS são:

- Larga cobertura e penetração: devido às frequências mais baixas utilizadas pelo TVWS, o sinal pode percorrer distâncias maiores e penetrar obstáculos permanentes, como prédios.
- Potencial de alta largura de banda: o TVWS pode oferecer dezenas de Mbps por canal em vários quilômetros e, combinando vários canais, é possível alcançar até 100 Mbps de largura de banda, o que é especialmente vantajoso para fornecer acesso à Internet em regiões com pouca infraestrutura.
- Menor custo de implantação: como o TVWS pode cobrir grandes áreas com poucas estações base devido ao longo alcance de cada estação, há menos necessidade de torres altas e investimento em infraestrutura de rede, tornando-o uma opção relevante para conectividade rural.
- Potencial de acesso em regiões remotas: em países com dimensões continentais, como o Brasil, onde a cobertura móvel nas áreas rurais e remotas é problemática, o TVWS pode oferecer uma solução viável para levar a conectividade a essas regiões.

Apesar das vantagens, é importante destacar que a disponibilidade dos canais para TVWS varia dependendo da localização e hora do dia, uma vez que as emissoras de TV têm prioridade.

Além disso, os usuários compartilham os canais disponíveis, o que pode afetar o desempenho da conexão. Portanto, o TVWS tende a ter melhor desempenho em áreas rurais, onde o espectro geralmente é menos congestionado [11].

Uma estrutura regulatória que determine a alocação de espectro, regras de uso e áreas de operação é necessária para garantir a utilização eficiente do espectro, o compartilhamento justo e a operação segura dos dispositivos TVWS, permitindo que o TVWS se torne uma opção viável e eficaz para proporcionar acesso de qualidade aos serviços sem fio em regiões em desenvolvimento [11].

No geral, o TVWS apresenta um grande potencial para melhorar a conectividade em áreas rurais e remotas do Brasil, oferecendo uma alternativa viável e econômica para levar serviços de banda larga e IoT a regiões com infraestrutura limitada.

C. Disponibilidade dos canais para uso de TVWS no Brasil

Para avaliar o impacto do uso da tecnologia de TVWS no Brasil, é essencial analisar a disponibilidade de canais. Nesse contexto, definimos alguns termos importantes [12]:

Canal licenciado ou outorgado: canal utilizado por emissoras de TV ou Serviço de Retransmissão de Televisão (RTV) no município.

Canal vago: canal disponível para uso secundário no município.

Existem canais que, embora não estejam licenciados, também não são considerados vagos. A utilização desses canais depende de uma análise de viabilidade técnica, conforme detalhado no ato No 9751, publicado pela Anatel. Essa análise determina se um canal pode ser usado secundariamente sem afetar os canais adjacentes ou municípios vizinhos [13].

Sabendo que os canais vagos são elegíveis para o uso secundário do TVWS, realizamos uma análise sobre quantos municípios poderiam implementar o TVWS com base nos canais designados para essa tecnologia. Os resultados são apresentados na Figura 1, onde o eixo vertical indica a quantidade de municípios, com o número de canais vagos indicados no eixo horizontal [14].

Ao analisar os dados, percebemos que a quantidade de canais vagos e de municípios que podem explorar o TVWS é significativa. Alguns pontos notáveis incluem:

- 2.167 municípios possuem pelo menos um canal vago, disponível para exploração secundária;
- Mais de 50% das cidades com canais vagos têm pelo menos dois canais disponíveis, representando uma banda de 12 MHz;
- As cidades com o maior número de canais livres possuem 17 canais, totalizando 102 MHz de banda disponível para uso secundário.

Essa análise foi realizada com base nos canais registrados como vagos na base de dados da Anatel [14]. Contudo, na prática, esse número pode ser maior. Alguns estudos, como o mencionado em [15], realizaram medições para verificar se os canais de TV listados como ativos na base de dados da Anatel estão, de fato, em uso. Os resultados indicaram que, nas zonas

onde as medições foram feitas, existem canais licenciados, mas sem transmissão de sinais de TV. Este estudo destaca a importância da atualização constante dos canais para evitar o desperdício de banda e também indica que o uso de sensoriamento espectral pode ser uma abordagem eficiente para o Brasil.

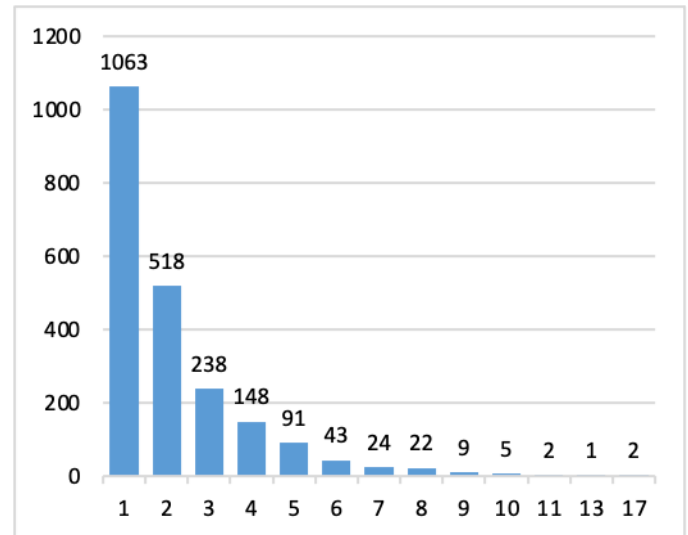


Fig. 1. Histograma da quantidade de cidades por quantidade de canais vagos

D. 5G utilizando espectro TVWS

O 5G representa a última geração em comunicações móveis atualmente em uso. Com a introdução desta tecnologia, o 3GPP definiu globalmente as bandas de operação possíveis para o 5G. Operadoras de telefonia móvel e agências reguladoras de espectro estão interessadas em utilizar essas bandas devido aos benefícios significativos que podem trazer para a sociedade e para o mercado de telecomunicações nacional.

A faixa definida como Faixa IV na Seção III.A da Resolução Anatel Nº 747 é uma das bandas de operação NR 5G propostas pelo 3GPP, conhecida como banda n71, operando no modo FDD (*Frequency-division duplexing*). As frequências de 617 a 652 MHz são designadas para *downlink* e de 663 a 698 MHz para *uplink*. Além disso, nesta banda o 5G pode operar com larguras de banda de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz [16]. Logo, para uma cidade adotar o 5G na banda n71, são necessários dois canais vagos, um para *downlink* e outro para *uplink*, cada um dentro de suas respectivas faixas de frequência. A largura de banda necessária é de 5 MHz, o que é viável, considerando que os canais disponíveis possuem 6 MHz de largura de faixa cada. Após analisar todas as cidades brasileiras sob essas condições, verificamos que 169 municípios cumprem os requisitos necessários.

Para avaliar o potencial impacto da implementação do 5G nessa banda, iniciamos um estudo teórico abrangendo todos os 169 municípios que atendem às condições atuais para o uso do 5G na banda n71.

Propomos e investigamos uma implementação utilizando as estruturas de torres de TV existentes nas cidades que

atendem às condições para transmitir o sinal 5G na banda do TVWS. Nesta implementação, as mesmas condições da rede celular são mantidas, mas a posição e a altura da torre são alteradas. Este tipo de implementação foi explorado em [17], onde o autor verificou que o uso de antenas mMIMO em torres de TV, que são usualmente mais altas do que as estações rádio base tradicionais, pode cobrir uma área significativamente maior.

Utilizamos dados sobre a localização das estações de TV fornecidos pelo banco de informações da Anatel, além de informações sobre as frequências disponíveis em cada cidade [14].

Para as análises de cobertura, definimos os parâmetros para o Link Budget conforme indicado na Tabela I. Nesta tabela, o valor adotado para a sensibilidade de recepção já considera o ganho da antena de recepção do dispositivo móvel.

A potência média de transmissão foi definida respeitando o limite de 1W de pico na saída do transmissor. Para isso, utilizamos os conceitos definidos em [18], e consideramos um PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) de 10,23. Assim, a potência média de transmissão é de 97,75 mW.

TABELA I. PARÂMETROS CONSIDERADOS NO LINK BUDGET.

Parâmetros	Valores
Sensibilidade de recepção (dBm) [19]	-93
Potência média de TX (dBm)	19,9
Ganho de antena de TX (dBi)	16
Altura de antena UE (m)	1,5

Para as análises realizadas neste artigo optou-se por utilizar o modelo de propagação Okumura-Hata, adequado para análises na faixa de frequência de 150 MHz a 1.500 MHz, e que é amplamente utilizado para prever a perda de propagação em ambientes urbanos e suburbanos. Este modelo é derivado de extensivas medições empíricas e oferece uma formulação para calcular a perda média de percurso entre uma estação rádio base e um receptor móvel [20].

Para áreas urbanas e suburbanas, o modelo se ajusta para prever a atenuação do sinal. No nosso estudo, consideramos uma cidade como urbana quando possui uma população superior a 400.000 habitantes e como suburbana quando ela possui menos de 400.000 habitantes.

Com os parâmetros apresentados na Tabela I, a perda de percurso máxima admissível é de 128,9 dB. Utilizando as equações do modelo de Okumura-Hata [20], calculamos a extensão da cobertura teórica para as estações rádio base nos municípios estudados. Em média, a distância de cobertura alcançou um raio de 3,36 km, resultando em uma área de cobertura por estação rádio base de 35,47 km², considerando uma cobertura circular.

Conforme esperado, a cobertura por estação rádio base foi relativamente pequena devido à limitação de potência definida atualmente no regulamento. No entanto, em testes recentes do TVWS realizados no Brasil [21], os testes de campo indicaram que a potência poderia ser aumentada para 10 Watts de pico sem causar interferência no sinal de TV, desde que utilizada a forma de onda GFDM (*Generalized Frequency Division*

Multiplexing). Neste contexto, o PARP seria 10 e a nova potência média de transmissão a ser utilizada seria 1W, equivalente a 30 dBm. Considerando esta potência de transmissão e mantendo-se os demais parâmetros definidos na Tabela I, a perda por percurso máxima admissível passa para 139 dB e, em média, a distância de cobertura alcança um raio de 7,19 km e a área de cobertura média por estação rádio base passa a ser de 162,41 km². As áreas de cobertura calculadas foram mapeadas e podem ser visualizadas na Figura 2 para os 169 municípios onde a implementação do 5G na banda de TVWS é possível.



Fig. 2. Cobertura teórica do 5G NR utilizando a torre de TV existente para todos os municípios que atendem aos requisitos

Os resultados obtidos para os 169 municípios estão de acordo com o esperado. A maioria dos municípios brasileiros não possui os requisitos necessários para a implementação do 5G FDD na banda n71, especificamente a disponibilidade de pelo menos dois canais vagos na banda. Como resultado, a cobertura proporcionada por essa implementação é baixa em comparação ao tamanho do território nacional. De acordo com nosso estudo, a soma das áreas de cobertura resultaria em uma cobertura adicional de 27.447 km².

Embora essa cobertura não seja muito expressiva, é importante ressaltar que esse valor foi obtido apenas na análise do 5G na Faixa IV, dentre as faixas constantes na Resolução da Anatel n° 747 [10]. Ainda existem as faixas I, II e III, que possuem grandes faixas de frequências a serem exploradas. Nessas faixas, as frequências são menores, o que pode levar a áreas de cobertura maiores.

Outro ponto de destaque é que a soma da população desses 169 municípios, segundo os dados do IBGE, totaliza mais de 50 milhões de pessoas, que poderiam ser potencialmente beneficiadas com o sinal 5G na banda n71.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizamos uma análise da potencial utilização dos espaços em branco de TV (TVWS) no Brasil. Exploramos a regulamentação atual, os benefícios esperados com o uso dessas frequências e os principais desafios associados ao seu gerenciamento.

Também analisamos todos os canais definidos na Resolução Anatel nº 747 para uso secundário de dispositivos de White Space. Esta análise revelou a quantidade de municípios que possuem canais vagos, permitindo assim a utilização secundária. Algumas constatações importantes incluem:

- 2.167 municípios possuem pelo menos um canal de TV vago para uso de TVWS, disponível para exploração secundária;
- Mais de 50% das cidades com canais vagos têm pelo menos dois canais disponíveis, representando uma banda de 12 MHz;
- A cidade com o maior número de canais livres possui 17 canais, totalizando 102 MHz de banda disponível para uso secundário.

Identificamos que uma das faixas liberadas para uso de TVWS corresponde à banda de operação do 5G NR, a banda n71. Propusemos uma implementação utilizando a infraestrutura de torres de TV existentes nas cidades para a implantação da estação radio base. Foi realizada uma análise teórica do impacto potencial para o país e constatamos que as limitações impostas pela implementação do 5G nesta banda reduzem significativamente o número de cidades que poderiam ser beneficiadas por essa implementação. No entanto, os 169 municípios que atendem aos requisitos seriam muito beneficiados, totalizando uma cobertura de 27.447 km² e podendo atender até 50 milhões de habitantes com sinal 5G na banda n71.

Para complementar nosso estudo, em trabalhos futuros faremos uma análise do TVWS no Brasil também para as demais faixas de frequência definidas na Resolução da Anatel nº747.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo xGMobile – Centro de Competência EMBRAPII-Inatel em Redes 5G e 6G, com recursos financeiros oriundos do PPI IoT/Manufatura 4.0 do MCTI, através do Termo de Cooperação 052/2023, firmado com a EMBRAPII e pelo Projeto Brasil 6G, financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.020548/2021-07.

REFERÊNCIAS

- [1] A. M. Voicu, L. Simić and M. Petrova, "Survey of Spectrum Sharing for Inter-Technology Coexistence," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1112-1144, Secondquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2882308.
- [2] W. K. Alsaedi, H. Ahmadi, Z. Khan and D. Grace, "Spectrum Options and Allocations for 6G: A Regulatory and Standardization Review," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 4, pp. 1787-1812, 2023, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3301630.
- [3] IBGE. (2023). Acesso à Internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal 2022
- [4] M. Denkovska, P. Latkoski and L. Gavrilovska, "Geolocation database approach for secondary spectrum usage of TVWS," 2011 19th Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers, Belgrade, Serbia, 2011, pp. 369-372, doi: 10.1109/TELFOR.2011.6143565.
- [5] Nascimento, M.F.S. & Evangelista, R.B. & Silva, C.F.M. & Cavalcanti, F.R.P. & Almeida, A.L.F. & Silva, Y.C.B.. (2016). TV White Spaces for Digital Inclusion in Brazil. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*. 6. 6-15. 10.12721/2237-5112/rtic.v6n2p6-15.
- [6] LUO, Y.; GAO, L.; HUANG, J. Business modeling for TV White Space networks, in *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 5, p. 82-88, May 2015.
- [7] EDOCS Search Results | Federal Communications Commission. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/edocs/search-results?=&titleText=white%20space&bureau%5B0%5D=OE>>. Acesso em: 3 maio. 2024.
- [8] Ofcom. (2015). Implementing TV White Spaces [Review of Implementing TV White Spaces]. https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0034/68668/tvws-statement.pdf
- [9] ECC, "Technical and operational requirements for the possible operation of cognitive radio systems in the white spaces of the frequency band 470-790 MHz," Report 159, Jan, 2011
- [10] Anatel. (2021, October 5). RESOLUÇÃO ANATEL No 747 [Review of RESOLUÇÃO ANATEL No 747]. <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2021/1593-resolucao-747>
- [11] M. ISMAIL, M. KISSAKA and P. MAFOLE, "Television White Space Opportunities and Challenges: What Next for the Developing Countries?" 2019 IST-Africa Week Conference (IST-Africa), Nairobi, Kenya, 2019, pp. 1-9, doi: 10.23919/ISTAFRICA.2019.8764834
- [12] ANATEL. RELATÓRIO DE AUDITORIA no201505638. [s.l.: s.n.].
- [13] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. ATO No 9751. Disponível em: <https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=9905543&id_orgao_publicacao=0>.
- [14] Estações de TV, FM e OM. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/outorga-e-licenciamento/estacoes-de-tv-fm-e-om>>. Acesso em: 2 maio. 2024.
- [15] Avaliação Preliminar das Oportunidades de Espectro na Região Metropolitana de Niterói na Faixa UHF da TV Digital - Daniel da C. Vidal, Pedro V. C. Gonzalez, Tadeu N. Ferreira.
- [16] Bandas de Frequências padronizadas pelo 3GPP. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/areasc.asp>>. Acesso em: 3 maio. 2024.
- [17] A. E. Falou and M. -S. Alouini, "Enhancement of Rural Connectivity by Recycling TV Towers with Massive MIMO Techniques," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 4, pp. 78-83, April 2023, doi: 10.1109/MCOM.003.2200257.
- [18] N. Dinur and D. Wulich, "Peak-to-average power ratio in high-order OFDM," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 6, pp. 1063-1072, June 2001, doi: 10.1109/26.930636
- [19] MOHAN, M. Receiver Reference Sensitivity in 5G NR , BS conformance. Disponível em: <<https://mohit991.medium.com/receiver-reference-sensitivity-in-5g-nr-bs-conformance-933f60766e8b>>. Acesso em: 20 maio. 2024.
- [20] Okumura-Hata Propagation Model. Disponível em: <https://help.altair.com/winprop/topics/winprop/user_guide/proman/propagation_models/proman_prop_model_hata.htm>. Acesso em: 05 maio. 2024.
- [21] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), "Atividade 3.3 - Testes de Campo e Análise dos Resultados," 2023.
- [22] IBGE. (n.d.). Brasil | Cidades e Estados | IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>. Acesso em: 24 julho. 2024