



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

**OLÍVIA PEIXOTO DIOGO**

**Análise e perspectiva da utilização do TVWS no  
Brasil**

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

**OLÍVIA PEIXOTO DIOGO**

## **Análise e perspectiva da utilização do TVWS no Brasil**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistema de Comunicações.

Orientador:

Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Co-orientador:

Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D591a Diogo, Olívia Peixoto  
Análise e perspectiva da utilização do TVWS no Brasil /  
Olívia Peixoto Diogo ; Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos,  
orientador ; Tadeu Nagashima Ferreira, coorientador. Niterói,  
2022.  
76 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2022.m.14650030706>

1. Televisão digital. 2. Produção intelectual. I.  
Castellanos, Pedro Vladimir Gonzalez, orientador. II.  
Ferreira, Tadeu Nagashima, coorientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

OLÍVIA PEIXOTO DIOGO

ANÁLISE E PERSPECTIVA DA UTILIZAÇÃO DO TVWS NO BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

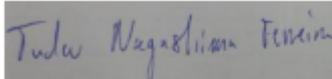
Área de concentração: Sistema de Comunicações.

Aprovado em 14 de janeiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos – Orientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira - Coorientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Mauricio Weber Benjó  
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. João Alfredo Cal Braz  
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

# Agradecimentos

Agradeço à Deus por ter conseguido concluir essa etapa tão desafiadora na minha vida.

Agradeço ao meu pai Olavo, minha mãe Maria Alice e minha irmã Aline, que são minha base, minha inspiração e meu apoio diário, sendo fundamentais me motivando até o final. Sem vocês nada disso seria possível.

Dedico também aos meus familiares, ao meu namorado Mauro e à família dele, meu cunhado Álvaro, aos meus amigos do Colégio Santo Inácio e da Universidade Federal Fluminense, que viveram tudo isso comigo e aos professores Pedro Castellanos e Tadeu Ferreira, que me orientaram em mais esta jornada.

É uma honra ter tido tantas pessoas presentes na minha vida que me ajudaram tanto esses anos. Dedico àqueles que foram citados e tantos outros que não explicitarei, mas que tenho um carinho muito grande.

Obrigada,  
Olívia Peixoto Diogo

# Resumo

A demanda por novos serviços de comunicações, vem aumentando a necessidade de novas faixas do espectro radioelétrico. Na atualidade, os serviços de banda larga têm permitido a grande parte da população dar continuidade as suas atividades de trabalho e estudo de forma remota. Porém, esta não é a realidade de regiões mais afastadas dos grandes centros urbanos. Através de medições na faixa UHF de TV Digital, foi observado que existe um desperdício de banda, os chamados espaços em branco de televisão ou *TV White Spaces*, que poderiam ser utilizados por novos serviços de acesso em banda larga. Este trabalho apresenta um estudo sobre o avanço do uso TVWS no mundo e uma avaliação preliminar através de simulações, com a utilização do software Seamcat, para validar o uso desta abordagem no cenário brasileiro.

**Palavras-chaves:** Televisão Digital, TVWS, Brasil.

# Abstract

The demand for new communications services is increasing the need for new bands in the radio spectrum. Currently, broadband services have allowed the majority of the population to continue their work and study activities remotely. However, this is not the reality of regions further away from large urban centers. Through measurements in the Digital TV UHF band, it was observed that there is a waste of band, the so-called blanks or TV White Spaces, which could be used by new broadband access services. This work presents a study on the advancement of TVWS use in the world and a preliminary evaluation through simulations, using the Seamcat software, to validate the use of this approach in the Brazilian scenario.

**Keywords:** Digital Television, TVWS, Brazil.

# Lista de Figuras

FIGURA 1 - UTILIZAÇÃO DA BANDA DE 6 MHz NA DTV. [4] .....	7
FIGURA 2 - SEGMENTAÇÃO DO CANAL DE 6 MHz NO BST-OFDM. [4] .....	8
FIGURA 3 - MAPA DE MEDIÇÃO EM ICARAÍ. [2].....	16
FIGURA 4 - ALOCAÇÃO DE CANAIS DEFINIDO PELA ANATEL PARA A FAIXA MEDIDA. [2] ...	17
FIGURA 5 - CANAIS CLASSIFICADOS COMO OCUPADOS ATRAVÉS DE DADOS MEDIDOS E UTILIZANDO COMO CRITÉRIO O LIMAR DE DETECÇÃO, NO PONTO 9. [2] .....	17
FIGURA 6 - ATENUAÇÕES DE EMISSÃO FORA DE BANDA. RECUPERADO DE (ANE, 2017).....	27
FIGURA 7 - DEFINIÇÃO DE EIRP. RECUPERADO DE (HENRY, 2014) .....	28
FIGURA 8 - EXEMPLOS DE DEP. RECUPERADO DE (ANE, 2017) .....	28
FIGURA 9 - HAAT. ....	29
FIGURA 10 - ENLACE DOS SISTEMAS VÍTIMA E INTERFERENTE. [28].....	34
FIGURA 11 - NÍVEIS DE SINAL USADOS PARA DETERMINAR A PRESENÇA OU AUSÊNCIA DE INTERFERÊNCIA. [29].....	35
FIGURA 12 - DISTÂNCIA ENTRE AS CÉLULAS CO-CANAIS .....	37
FIGURA 13 - CENÁRIO DE SIMULAÇÃO. O LADO ESQUERDO DA FIGURA APRESENTA O LINK VÍTIMA, ONDE A ANTENA RECEPTORA VÍTIMA É POSICIONADA EM CIMA DE UM PRÉDIO DE ALTURA VARIÁVEL E O LADO DIREITO APRESENTA O LINK INTERFERENTE, ONDE A ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE É VARIÁVEL. ....	38
FIGURA 14 - CENÁRIO DE SIMULAÇÃO. O LADO ESQUERDO DA FIGURA APRESENTA O LINK VÍTIMA, ONDE A ANTENA RECEPTORA VÍTIMA É POSICIONADA EM CIMA DE UMA RESIDÊNCIA DE ALTURA VARIÁVEL E O LADO DIREITO APRESENTA O LINK INTERFERENTE, ONDE A ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE É VARIÁVEL. ....	39
FIGURA 15 - PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA.....	39
FIGURA 16 - CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SEAMCAT PARA LTE.....	40
FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SEAMCAT PARA DTV.....	41
FIGURA 18 – ESQUEMA ILUSTRATIVO PARA GERAR GRÁFICOS DE IP .....	45
FIGURA 19 - A) 1º CENÁRIO: ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 6 M, ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DE 30 M, EIRP DOS EUA 36 dBm E FREQUÊNCIA CENTRAL 521 MHz DO CANAL 22; B) 2º CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DO 1º CENÁRIO PARA 60 M;.....	45
FIGURA 20 – ILUSTRAÇÃO DO 1º CENÁRIO DE SIMULAÇÃO.....	46
FIGURA 21 - A) 3º CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DO 1º CENÁRIO PARA 10 M; B) 4º CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DO 3º CENÁRIO PARA 40 M .....	47
FIGURA 22 - 5º CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DO 1º CENÁRIO PARA 40 M .....	47
FIGURA 23- A) 6º CENÁRIO: ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 40 M, ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DE 40 M, EIRP DOS EUA 36 dBm E FREQUÊNCIA CENTRAL 473 MHz DO CANAL 14; B) 7º CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 6º CENÁRIO PARA 521 MHz DO CANAL 22; C) 8º CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 6º CENÁRIO PARA 551 MHz DO CANAL 27; D) 9º CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 6º CENÁRIO PARA 563 MHz DO CANAL 29; E) 10º CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 6º CENÁRIO PARA 695 MHz DO CANAL 51 .....	48

FIGURA 24- A) 11° CENÁRIO: ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 40 M, ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DE 60 M, EIRP DOS EUA 36 DBM E FREQUÊNCIA CENTRAL 521 MHZ DO CANAL 22; B) 12° CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DO 5° CENÁRIO PARA 200 M.....	49
FIGURA 25- A) 13° CENÁRIO: ALTERAÇÃO DA EIRP DO 1° CENÁRIO PARA A DA COLÔMBIA DE 40 DBM; B) 14° CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DO 13° CENÁRIO PARA 60 M .....	50
FIGURA 26- A) 15° CENÁRIO: ALTERAÇÃO DA EIRP DO 3° CENÁRIO PARA A DA COLÔMBIA DE 40 DBM; B) 16° CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DO 15° CENÁRIO PARA 40 M .....	50
FIGURA 27- 17° CENÁRIO: AUMENTO DA ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DO 15° CENÁRIO PARA 40 M .....	51
FIGURA 28- A) 18° CENÁRIO: ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 40 M, ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DE 40 M, EIRP DA COLÔMBIA 40 DBM E FREQUÊNCIA CENTRAL 473 MHZ DO CANAL 14; B) 19° CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 18° CENÁRIO PARA 521 MHZ DO CANAL 22; C) 20° CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 18° CENÁRIO PARA 551 MHZ DO CANAL 27; D) 21° CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 18° CENÁRIO PARA 563 MHZ DO CANAL 29; E) 22° CENÁRIO: MUDANÇA DA FREQUÊNCIA CENTRAL DO 18° CENÁRIO PARA 695 MHZ DO CANAL 51 .....	52
FIGURA 29- A) 23° CENÁRIO: ALTURA DA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 40 M, ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DE 60 M, EIRP DA COLÔMBIA 40 DBM E FREQUÊNCIA CENTRAL 521 MHZ DO CANAL 22; B) 24° CENÁRIO: AUMENTO DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE DO 23° CENÁRIO PARA 200 M.....	53
FIGURA 30- A) <i>OUTLINE</i> COM POSICIONAMENTO DOS SISTEMAS VÍTIMA (VLT E VLR) E INTERFERENTE (ILT E ILR) .....	54
FIGURA 31- VARIAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE EM RELAÇÃO A DIFERENTES EIRPs, PARA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 6 M.....	55
FIGURA 32- VARIAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE EM RELAÇÃO A DIFERENTES EIRPs, PARA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 10 M.....	56
FIGURA 33- VARIAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA TRANSMISSORA INTERFERENTE EM RELAÇÃO A DIFERENTES EIRPs, PARA ANTENA RECEPTORA VÍTIMA DE 40 M.....	57
FIGURA 34- VARIAÇÃO DO CANAL EM RELAÇÃO A DIFERENTES EIRPs, PARA ANTENAS RECEPTORA VÍTIMA E TRANSMISSORA INTERFERENTE DE 40 M.....	57
FIGURA 35- VARIAÇÃO DAS ALTURAS DAS ANTENAS RECEPTORA VÍTIMA E TRANSMISSORA INTERFERENTE EM RELAÇÃO A DIFERENTES EIRPs, NO CANAL 22.....	58

# Lista de Tabelas

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DAS CLASSES DAS ESTAÇÕES DIGITAIS DE TELEVISÃO [4] .....	9
TABELA 2 - CANALIZAÇÃO DO SISTEMA DE TV NAS FAIXAS DE VHF E UHF [4].....	10
TABELA 3 - ASPECTOS TÉCNICOS DA REGULAMENTAÇÃO [11]. .....	29
TABELA 4 - FREQUÊNCIAS DISPONÍVEIS PARA ESPAÇOS EM BRANCO [20].....	30
TABELA 5 - PARÂMETROS DA ANTENA DE RECEPÇÃO DO SISTEMA VÍTIMA .....	41
TABELA 6 - PARÂMETROS DA ANTENA DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA VÍTIMA .....	42
TABELA 7 - PARÂMETROS DA ANTENA DE RECEPÇÃO DO SISTEMA INTERFERENTE .....	42
TABELA 8 - PARÂMETROS DA ANTENA DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA INTERFERENTE.....	42
TABELA 9 - RESUMO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÕES .....	44

# Lista de Abreviaturas e Siglas

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
PPGEET	Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica de Telecomunicações
HDTV	<i>High-Definition Television</i>
TVWS	<i>TV White Spaces</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
BBC	<i>British Broadcasting Corporation</i>
NHL	<i>Nippon Hoso Kyoka</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
ISDB	<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i>
SET	Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão
ABERT	Associação Brasileira de Rádio e Televisão
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações

BST-OFDM	<i>Band-Segmented Transmission Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
RTV	Retransmissão de televisão
ITU	União Internacional de Telecomunicações
<i>IMT</i>	<i>International Mobile Telecommunications</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
WSDs	<i>White Space Devices</i>
PU <sub>s</sub>	<i>Primary Users</i>
WSDB	<i>White Space Database</i>

# Sumário

<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Estrutura do Trabalho .....	2
<b>Capítulo 2 - TV Digital.....</b>	<b>4</b>
2.1 História da TV Digital .....	4
2.2 Digitalização .....	6
2.3 Dividendo digital .....	11
2.4 Oportunidades de espectro .....	11
<b>Capítulo 3 - White Space e Rádio Cognitivo.....</b>	<b>13</b>
3.1 White Space .....	13
3.2 Rádio Cognitivo.....	18
<b>Capítulo 4 - Regulamentações de TVWS no mundo .....</b>	<b>21</b>
4.1 Regulamento ao redor do mundo .....	21
4.1.1 Estados Unidos da América (EUA), FCC .....	23
4.1.2 Reino Unido (UK), Ofcom .....	24
4.1.3 Europa, CEPT .....	25
4.1.4 Colômbia, ANE.....	25
4.2 Aspectos técnicos .....	27
4.3 Perspectiva do Brasil .....	31
<b>Capítulo 5 - Seamcat .....</b>	<b>33</b>
5.1 Introdução .....	33
5.2 O Simulador .....	34
5.3 Interferência .....	35
5.4 Interferência Co-canal.....	37
<b>Capítulo 6 - Simulações e resultados .....</b>	<b>38</b>
6.1 Introdução .....	38
6.2 Simulações .....	43
6.3 Resultados.....	54
<b>Capítulo 7 - Conclusão .....</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>60</b>



# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Motivação

Inicialmente, o intuito das pesquisas na área de TV era melhorar a qualidade da imagem por meio do formato HDTV (*High-Definition Television*) e, para isso, deveria haver avanços na capacidade de transmissão de sinais televisivos convencionais, ainda mantendo o formato analógico utilizado até então. Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, foram pesquisados sobre os sistemas de transmissão de sinais de TV que mais se adequavam às necessidades do Brasil, e deu início ao surgimento da Televisão Digital no país.

A digitalização da TV otimizou o espectro de frequências, através da redução da “banda de guarda”, ou seja, o espaço entre os canais adjacentes, que visa evitar interferências, e a alocação dos canais de televisão foi modificada, resultando em um uso mais eficiente do espectro. Após o desligamento dos canais analógicos, algumas bandas ficaram inutilizáveis, resultando em espaços em branco de TV (TVWS - *TV White Spaces*), que são grandes porções do espectro liberado nas bandas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). [1]

Dado que o espectro radioelétrico é um recurso limitado, a demanda por banda e o aumento da quantidade de serviços e da procura de dados tem tornado este bem escasso. Desta forma, é necessário avaliar e planejar a forma como os serviços utilizam o espectro eletromagnético de forma mais eficiente. Nesse sentido, as políticas tradicionais de gestão do espectro devem ser revistas, considerando a partilha do espectro.

Em todo o mundo, vários países e agências reguladoras estão definindo padrões para o uso de TVWS. No Brasil, existem algumas iniciativas que analisam sua viabilidade, mas, como o Brasil tem dimensões continentais, há problemas relacionados à cobertura móvel. As características de propagação na faixa de VHF / UHF o tornam ideal para uso em áreas rurais, onde o custo de implantação de infraestrutura cabeada é alto e soluções sem fio em frequências mais altas dificilmente são viáveis devido à vegetação que intercepta a linha de visão. O uso desta tecnologia de compartilhamento de espectro pode fornecer acesso de banda larga confiável e de baixo custo, então é um modelo para tais áreas no Brasil. Além disso, a chegada do conceito do rádio cognitivo em 1999, possibilitou aproveitar os espaços em branco, por serem uma solução para a divisão do espectro de frequências entre os usuários sem licença, capazes de identificar canais ociosos, utilizando-os de forma

oportunista. Atualmente, existem vários trabalhos em desenvolvimento sobre TVWS no Brasil, e é possível verificar que há muitas oportunidades, mesmo em um ambiente urbano denso, como podemos ver em [2].

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a realização de um levantamento bibliográfico das principais metodologias para o uso do TVWS. Um segundo objetivo é a realização de simulações para obter a distância para instalação de Rádio Cognitivo operando em TVWS.

A demanda por novos serviços de comunicações aumenta a necessidade de novas bandas no espectro de rádio. Atualmente, os serviços de banda larga têm permitido que a maioria da população continue suas atividades de trabalho e estudo em *home office*. No entanto, essa não é a realidade de regiões mais distantes dos grandes centros urbanos. Por meio de medições na banda UHF da TV Digital, observou-se o uso ineficiente de parte do espectro com algumas bandas sem uso, ou seja, os chamados Espaços Brancos de TV, que poderiam ser aproveitados por novos serviços como por exemplo serviços de acesso em banda larga. Devido às novas tecnologias e o legado a nível de ocupação espectral da TV digital, é possível a utilização dessas oportunidades de espectro para o uso de sistemas cognitivos. Este trabalho apresenta um estudo sobre o avanço do uso de Espaços Brancos de TV no mundo e uma avaliação preliminar por meio de uma campanha de medição e simulações para validar o uso dessa abordagem.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento desta dissertação está estabelecido como descrito a seguir. Será apresentada no capítulo 2 a história da televisão digital, o surgimento do Sistema Brasileiro de TV Digital e suas características, o processo de digitalização e o dividendo digital, e oportunidades de espectro que decorrem desse processo, em seguida, o capítulo 3 irá explicar o surgimento dos *White Spaces* e suas aplicações, bem como o Rádio Cognitivo, no capítulo 4, serão apresentadas as Regulamentações de TVWS ao redor do mundo, frequências e modos de operação, na sequência, o capítulo 5 apresenta o simulador Seamcat e seu funcionamento, o capítulo 6 como as simulações foram realizadas e os parâmetros utilizados,

o capítulo 7 mostra os resultados obtidos através das simulações, e, o capítulo 8 finaliza com as conclusões após análise das informações.

# Capítulo 2 - TV Digital

## 2.1 História da TV Digital

A televisão é um dos principais meios de comunicação social, gerando informação e entretenimento. Os sinais da televisão aberta, que permitem aos telespectadores assistirem às programações das emissoras de forma gratuita, são transmitidos há mais de 50 anos no padrão analógico.

Desde a implantação da BBC (*British Broadcasting Corporation*) de Londres, primeiro canal de TV, fundada em 1936, a televisão tem passado por modificações, processos constantes de evolução e adequação às novas necessidades sociais. A década de 50 marcou história com a televisão em cores, que realizou a transmissão de imagens coloridas. No final da década de 70, foram testados diferentes tipos de modulações do sinal audiovisual digital para transmissão terrestre e por satélite. Com o passar do tempo, a tendência mundial para os meios de comunicação em massa foi o movimento de convergência digital, conhecido como TV Digital.

O começo da história da TV Digital ocorreu através de estudos da TV pública japonesa do NHL (*Nippon Hoso Kyoka*) e mais cem estações comerciais, que buscavam qualidade de imagem e som na televisão equivalente a cinema, e desenvolveram, assim, uma TV de alta definição, chamada HDTV. O avanço destes estudos despertou a atenção de potências mundiais como Estados Unidos e Europa, alavancando pesquisas relacionadas à melhoria da qualidade de transmissão e imagem.

Os europeus decidiram, no final de 1993, desenvolver um padrão totalmente digital, adotando o padrão MPEG, e criaram o consórcio DVB (*Digital Video Broadcasting*), sendo que a versão para radiodifusão terrestre (DVB-T) entrou em operação cinco anos depois na Inglaterra, em 1998. Os americanos, por sua vez, criaram o padrão ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), que começou a ser desenvolvido em 1987 e entrou em operação também em 1998. Semelhante ao padrão europeu, o sistema japonês ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*), padrão totalmente digital, que começou a ser desenvolvido em 1997, entrou em operação com transmissão via satélite em 2000.

No Brasil, em 1996 foi o início da TV com formato digital, através de TVs por assinatura via satélite, como Directv e SKY. A imagem era transmitida em sinal digital, porém em baixa definição e com bastante limitação de interatividade.

Desde 1994 estava sendo desenvolvido o estudo para a implantação de um sistema digital de TV aberta em alta definição no Brasil, por um grupo composto pela Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão (SET) e pela Associação Brasileira de Rádio e Televisão (ABERT). Em 1998, ao receber o suporte da Universidade Presbiteriana Mackenzie, o grupo iniciou vários testes nos três sistemas já estruturados, DVB, ATSC e ISDB, concluindo que o padrão ISDB-T era o sistema de TV Digital que melhor se enquadrava no cenário brasileiro. Alguns fatores que influenciaram nessa decisão foram motivos técnicos como estabilidade para dispositivos móveis e maior recepção em ambiente fechado, e a isenção do governo brasileiro no pagamento de *royalties* para o Japão. [3]

Sendo assim, em 2003 foi criado o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD), com o objetivo de desenvolver uma recomendação padrão na qual o sistema de TV Digital pudesse se basear e contou com um comitê formado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações (CPqD) e por empresas de telecomunicações. O SBTVD iniciou oficialmente os estudos para o processo de transição para um modelo digital de TV no Brasil naquele ano. Nessa fase, definiram-se os requisitos do sistema, tecnologias e padrões a serem utilizados e políticas de implantação.

O SBTVD nasceu como uma versão do ISDB-Tb, Sistema Integrado de Radiodifusão Digital transmitido por ondas terrestres, por ser uma versão modificada da plataforma japonesa ISDB-T, adaptada para as necessidades brasileiras, sendo adotado também em outros países como Argentina e Peru.

Em 26 de Junho de 2006, a TV Digital foi, então, regulamentada no Brasil pelo Ato Presidencial número 5.820, oficializando o ISDB-T como a base para o sistema oficial de transmissão de TV digital no Brasil, o SBTVD. Desde outubro de 2007 o sistema já atua em várias cidades brasileiras.

Foram definidos 45 canais em UHF, de 14 a 69, na faixa de 470-806 MHz. Desta forma, automaticamente, os detentores de canais analógicos foram atribuídos aos canais digitais. Cada canal permaneceu com a largura de banda de 6 MHz, porém, houve uma condição de que apenas os serviços públicos poderiam operar com multiprogramação, proibindo, então, os canais comerciais desta operação. [3]

## 2.2 Digitalização

As técnicas de digitalização proporcionaram transporte de sinais de HDTV ainda melhores, além de outras funcionalidades comuns para esse tipo de sistema, como permitir que mais informações pudessem ser enviadas, com melhor qualidade de áudio e vídeo, aumentar a oferta de programação e possibilitar novos serviços e aplicações.

Atualmente, no Brasil, estamos na etapa final de transição do sistema de televisão analógica para o digital, o *switch-off*, ou seja, o desligamento total da TV analógica. Para se adaptar a essa realidade, os usuários precisam adquirir novos equipamentos ou aparelhos de TV que convertam o sinal digital recebido em um sinal analógico, a ser reproduzido no aparelho de TV analógico. [4]

A digitalização da TV brasileira tem sido um processo extenso e complexo. Os estudos e testes em laboratório e de campo sobre este tema se tornaram mais intensificados em 2001, quando o Ministério das Comunicações atribuiu à Anatel esta incumbência, para a implantação da TV digital no Brasil. Apenas em 2006 foi adotado o sistema de transmissão digital terrestre de televisão ISDB-T, estabeleceram-se as diretrizes para o período de transição, as condições para consagração de canal adicional para a transmissão simultânea analógica / digital, e fixou cronograma para a transição tecnológica. Em 2007 houve o início das transmissões comerciais da televisão digital no Brasil, na cidade de São Paulo, e, em 2019, foi concluída a primeira fase do desligamento da TV analógica no Brasil, atingindo 1.378 municípios brasileiros, 130 milhões de pessoas, todas as capitais brasileiras, o Distrito Federal, e os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, de acordo com a Anatel. [5] No Brasil, o Ministério das Comunicações estabeleceu que o plano de digitalização seria implementado gradativamente, ao invés de uma só vez.

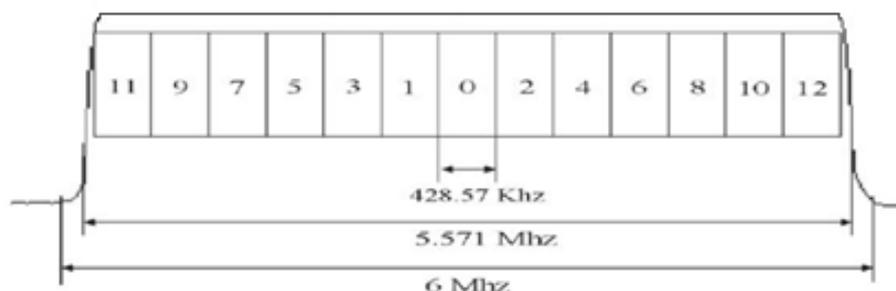
A digitalização da televisão é um processo em que a transmissão de TV analógica é substituída pela digital. A decisão dessa transição ocorreu pelas vantagens da TV digital em detrimento da analógica. Algumas dessas vantagens são a otimização do espectro de frequência, estabilidade e confiabilidade do sinal, maior qualidade imagem com mais linhas de resolução, maior qualidade de som com mais números de canais de áudio, e, em geral, a possibilidade de atualizar as televisões brasileiras com as tecnologias mais avançadas do setor de radiodifusão. Emissoras e programadores obtiveram novos benefícios, como o aumento de robustez no percurso de propagação até o receptor através da possibilidade de configurar o sinal transmitido de acordo com as condições de recepção, onde o sinal pode

ser atingido por qualquer tipo de degradação. Mecanismos tais como compressão de informação, que permitem que mais conteúdo seja transmitido nos mesmos canais, porque na transmissão digital o sinal pode ser compactado, e assim, tem uma menor taxa de transmissão. Códigos corretores de erros e diversos esquemas de modulação permitem que o sistema de TV digital possa ser utilizado em diversos ambientes e condições de propagação. Em relação aos usuários, a interatividade é um grande ganho, que é possível através da integração com outras mídias, como a internet. Houve também uma mudança significativa no espectro de frequência com a transmissão de mais canais, onde um canal analógico SD ocupava uma banda de 6 MHz VHF e com esta mesma banda é possível alocar quatro canais digitais SD UHF, aumentando a diversidade de programação.



**Figura 1 - Utilização da banda de 6 MHz na DTV. [4]**

Na banda de 6 MHz o sinal é transmitido através da técnica de multiplexação por banda segmentada, também conhecida como BST-OFDM (*Band-Segmented Transmission Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), uma especificação das normas definidas para o sistema SBTVD-T. Esta banda é dividida em 13 segmentos de 429 kHz, onde vários segmentos são agrupados e modulados de forma independente. A segmentação proporciona robustez e permite que diferentes programas sejam transmitidos simultaneamente, com diferentes técnicas de modulação, como ocorre na transmissão do serviço de áudio, serviço de dados e de televisão. Nestes exemplos, cada serviço ocupa um subconjunto do total de segmentos e, ao mesmo tempo, todos estão presentes do mesmo canal de 6 MHz. A figura abaixo apresenta a ilustração da segmentação do canal de 6 MHz no BST-OFDM.



**Figura 2 - Segmentação do canal de 6 MHz no BST-OFDM. [4]**

A técnica BST-OFDM, permite diferentes tipos de configuração de transmissão, e, desta maneira, possibilita adequar o sinal de acordo com as condições de propagação e taxas de dados. Outro atributo é a modulação de cada segmento com diferentes parâmetros, com serviços otimizados de áudio e dados, para a recepção móvel, e de televisão, para recepção estacionária de um ambiente de multipercurso.

OFDM é um método de multiplexação por divisão de frequência, uma técnica de modulação que divide a banda do canal em múltiplas sub-portadoras ortogonais, não havendo interferência entre elas. Tipos de modulação diferentes podem ser aplicadas em cada sub-portadora, como PSK ou QAM. A modulação OFDM permite a inserção do intervalo de guarda no início de cada símbolo, aumentando a imunidade a multipercurso, viabilizando a recepção em ambientes com mobilidade. [4]

Em comparação com técnicas que utilizam uma única portadora, a OFDM possui grandes vantagens, como por exemplo obter a mesma taxa de transferência. Essas vantagens surgem devido ao paralelismo de sub-portadoras de taxas baixas. Este paralelismo aumenta a capacidade de suportar condições extremas no meio de transmissão, tais como a atenuação de altas frequências em longos cabos de cobre, a atenuação seletiva de frequências devido a problemas de multipercurso, além da interferência intersimbólica, que pode ser causada pela reflexão em rede sem fio.

Sobre as estações de televisão digital, é importante ressaltar que são classificadas quanto ao número de canais, potência, altura da antena e distância máxima ao contorno do serviço (área de proteção onde a estação da TV deverá operar livre de interferências), na faixa de UHF. As classes são: Classe Especial, Classe A, Classe B e Classe C, conforme tabela abaixo. A tabela 1 apresenta as características das classes das emissoras de televisão digital.

**Tabela 1 - Características das classes das estações digitais de televisão [4]**

Classe	Canais	Máxima Potência de Transmissão (ERP)	Altura da Antena de Transmissão (m)	Zona de Operação sem Interferência (km)
Especial	14 - 46	80 kW	150	57
	47 - 68	100 kW		
A	14 - 68	8 kW		42
B	14 - 68	0.8 kW		29
C	14 - 68	0.08 kW		18

A Classe Especial é utilizada para Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens (TV). As Classes A, B e C, por outro lado, são utilizadas para a função de RTV (Retransmissão de televisão), que realiza a retransmissão de forma simultânea dos sinais de estação geradora de TV para recepção livre e gratuita pelo público geral.

No que se refere ao espectro eletromagnético, a sua divisão é feita por tipos de serviços, tendo o espectro televisivo duas bandas: VHF (canais 2 a 13) e UHF (canais 14 a 51), como mostrado na tabela 2 abaixo.

**Tabela 2 - Canalização do Sistema de TV nas faixas de VHF e UHF [4]**

CANAL	LARGURA DE FAIXA	PORTADORA DE VIDEO	PORTADORA DE SOM	OXILADOR LOCAL	CANAL	LARGURA DE FAIXA	PORTADORA DE VIDEO	PORTADORA DE SOM	OXILADOR LOCAL
2	54-60	55.25	59.75	101	43	644-650	645.25	649.75	691
3	60-66	61.25	65.75	107	44	650-656	651.25	655.75	697
4	66-72	67.25	71.75	113	45	656-662	657.25	661.75	703
5	76-82	77.25	81.75	123	46	662-668	663.25	667.75	709
6	82-88	83.25	87.75	129	47	668-674	669.25	673.75	715
7	174-180	175.25	179.75	221	48	674-680	675.25	679.75	721
8	180-186	181.25	185.75	227	49	680-686	681.25	685.75	727
9	186-192	187.25	191.75	233	50	686-692	687.25	691.75	733
10	192-198	193.25	197.75	239	51	692-698	693.25	697.75	739
11	198-204	199.25	203.75	245	52	698-704	699.25	703.75	745
12	204-210	205.25	209.75	251	53	704-710	705.25	709.75	751
13	210-216	211.25	215.75	257	54	710-716	711.25	715.75	757
14	470-476	471.25	475.75	517	55	716-722	717.25	721.75	763
15	476-482	477.25	481.75	523	56	722-728	723.25	727.75	769
16	482-488	483.25	487.75	529	57	728-734	729.25	733.75	775
17	488-494	489.25	493.75	535	58	734-740	735.25	739.75	781
18	494-500	495.25	499.75	541	59	740-746	741.25	745.75	787
19	500-506	501.25	505.75	547	60	746-752	747.25	751.75	793
20	506-512	507.25	511.75	553	61	752-758	753.25	757.75	799
21	512-518	513.25	517.75	559	62	758-764	759.25	763.75	805
22	518-524	519.25	523.75	565	63	764-770	765.25	769.75	811
23	524-530	525.25	529.75	571	64	770-776	771.25	775.75	817
24	530-536	531.25	535.75	577	65	776-782	777.25	781.75	823
25	536-542	537.25	541.75	583	66	782-788	783.25	787.75	829
26	542-548	543.25	547.75	589	67	788-794	789.25	793.75	835
27	548-554	549.25	553.75	595	68	794-800	795.25	799.75	841
28	554-560	555.25	559.75	601	69	800-806	801.25	805.75	847
29	560-566	561.25	565.75	607	70	806-812	807.25	811.75	853
30	566-572	567.25	571.75	613	71	812-818	813.25	817.75	859
31	572-578	573.25	577.75	619	72	818-824	819.25	823.75	865
32	578-584	579.25	583.75	625	73	824-830	825.25	829.75	871
33	584-590	585.25	589.75	631	74	830-836	831.25	835.75	877
34	590-596	591.25	595.75	637	75	836-842	837.25	841.75	883
35	596-602	597.25	601.75	643	76	842-848	843.25	847.75	889
36	602-608	603.25	607.75	649	77	848-854	849.25	853.75	895
37	608-614	609.25	613.75	655	78	854-860	855.25	859.75	901
38	614-620	615.25	619.75	661	79	860-866	861.25	865.75	907
39	620-626	621.25	625.75	667	80	866-872	867.25	871.75	913
40	626-632	627.25	631.75	673	81	872-878	873.25	877.75	919
41	632-638	633.25	637.75	679	82	878-884	879.25	883.75	925
42	638-644	639.25	643.75	685	83	884-890	885.25	889.75	931

A faixa VHF se estende de 30 MHz a 300 MHz, transmitindo de 54 MHz a 216 MHz (canais 2 ao 13), sendo a faixa de 88 MHz a 108 MHz utilizada na transmissão de rádio FM. Já a faixa UHF se estende de 300 MHz a 3 GHz, transmitindo de 470 MHz a 698 MHz (canais 14 ao 51). Nesta faixa de UHF ocorre o que a União Internacional de Telecomunicações (ITU) chama de “dividendo digital”, decorrente do desligamento do sinal analógico de TV (698-806 MHz).

## 2.3 Dividendo digital

Na transmissão analógica dada a necessidade de transmissão com alta potência, em muitos dos casos existe um canal não utilizado entre dois canais adjacentes para evitar interferência. Já na transmissão digital, os canais adjacentes não causam interferências uns aos outros, se respeitadas as máscaras de transmissão. Sendo assim, o planejamento de televisão digital utiliza a estratégia de reaproveitamento de frequência para eliminar a interferência entre torres de transmissão. Esta estratégia também é utilizada em redes celulares, onde em duas áreas adjacentes é alocado um conjunto de canais distintos, evitando o uso do mesmo canal de DTV em duas regiões vizinhas. Logo, nesta transição de transmissão analógica para digital, muito espectro poderia estar inutilizado, onde canais específicos não são usados. [1]

Diante deste cenário, a ANATEL aprovou em 11 de novembro de 2013, a atribuição da faixa de radiofrequências de 689 MHz a 806 MHz (canais 52 a 69) para as Telecomunicações Móveis Internacionais (*International Mobile Telecommunications - IMT*). Este processo é o chamado “dividendo digital”, onde a faixa de 700 MHz seria destinada para o LTE (*Long Term Evolution*) na maioria dos municípios no Brasil, onde anteriormente era ocupado pelo serviço de radiodifusão de sons e imagens (TV), de retransmissão de imagens (RTV) e de repetição de sons e imagens (RpTV). Em detrimento desta mudança de serviço destinado à faixa, os serviços de radiodifusão devem ser realocados nas faixas de VHF e UHF. Como nos grandes centros urbanos a faixa UHF já contém outros canais de TV alocados, é necessário o uso da faixa de televisão em VHF. Assim, surge a questão da utilização da faixa de VHF Alto, de 174 a 216 MHz (canais 7 a 13 de televisão), onde é preciso levar em consideração os parâmetros de operação do SBTVD-T nas condições de propagação oferecidas pelo território brasileiro. [6]

## 2.4 Oportunidades de espectro

É possível agora afirmar que a TV digital utiliza menos espectro do que a analógica e esta transição para o digital produziu o dividendo, que proporcionou as oportunidades de espectro. Os ganhos produzidos pelo dividendo digital, aumentaram o potencial de novas oportunidades de utilização eficiente do espectro nas redes comunitárias, nomeadamente nos rádios cognitivos. Uma das vantagens do uso da faixa UHF da TV é que são frequências que

têm menor perda com a distância se comparadas com as frequências utilizadas pelos sistemas atuais de banda larga. Dessa forma, surgem incríveis oportunidades para conectar comunidades distantes em áreas rurais, especialmente porque não há perspectiva de instalar estrutura de fibra óptica em tais comunidades. [3]

A digitalização no serviço de televisão terrestre, portanto, é um processo que trouxe muitos benefícios, como a otimização do espectro de frequências. O espaço necessário para “banda de guarda” entre canais adjacentes, que tem o objetivo de evitar interferência, foi reduzido, a alocação dos canais de televisão foi modificada, e a consequência foi um uso mais eficiente do espectro. Durante este processo, a banda UHF destinada ao serviço de televisão digital (470 - 700 MHz) foi ocupada predominantemente por canais digitais e analógicos ao mesmo tempo. Posteriormente, com o desligamento dos canais analógicos, algumas bandas passam a ser inutilizadas, resultando em espaços em branco de TV, que serão explicados a seguir. [1]

Até o momento, a faixa é usada exclusivamente pelos canais destinados às transmissoras de TV. Entretanto, é possível perceber que com o aumento da quantidade de serviços e da demanda de dados, o espectro está se tornando escasso. Sendo assim, há a necessidade de avaliar e planejar um meio dos serviços utilizarem de maneira mais oportuna o espectro eletromagnético.

Nesta direção, para que o espectro seja aproveitado de forma eficiente, oportunista e dinâmica, as políticas tradicionais de gerenciamento de espectro precisam ser revisadas e, neste contexto, é importante estudar sobre o compartilhamento de espectro.

## Capítulo 3 - White Space e Rádio Cognitivo

### 3.1 White Space

A ANATEL é o órgão responsável por regulamentar o espectro no Brasil e, desta maneira, algumas de suas ações são dividir o espectro, destinando-o para fins específicos, controlar e parametrizar seu uso.

Em relação ao controle, foi realizada a divisão do espectro pela ANATEL em segmentos, visando obter maior controle espectral. Cada um destes segmentos foi alocado para um determinado serviço, e, por consequência, nenhum outro serviço pode fazer uso da faixa de frequência atribuído àquele serviço, estando sob a punição de multa, no caso de haver uma infração. O objetivo principal do plano de atribuição de frequências é de organizar e proteger contra interferência os diversos serviços de comunicação. É possível perceber, por exemplo, um impacto direto na população caso as frequências destinadas à SAMU, telefonia móvel e navegação do transporte aéreo falharem, causando em alguns casos até mesmo graves acidentes.

Na faixa UHF, encontra-se a faixa de TV digital, compreendida entre 470 e 700 MHz. Esta faixa é formada e mapeada pelos canais 14 ao 51, com exceção do canal 37, que é reservado para a radioastronomia. Os canais subsequentes, de 52 a 69, previamente eram utilizados pela transmissão da TV aberta, porém, em 2013 foram leiloados para utilização do serviço de 4G. Pela Resolução 583 da ANATEL, o uso destes canais, nesta faixa de frequência, é destinado exclusivamente para as transmissoras de TV, com suas regulamentações de uso. [1]

Conforme mencionado anteriormente, diversos autores têm analisado através de pesquisas espectrais, que a banda de TV é subutilizada, devido à atual normativa de atribuição do espectro, possuindo espaços entre os canais ativos que não estão sendo aproveitados. Tais espaços entre canais ativos, são chamados “Espaços em Branco” e podem variar de acordo com a localização geográfica. Em algumas regiões, os Espaços em Branco de TV, ou *TV White Spaces* (TVWS), são mais perceptíveis devido à sua localização ser mais afastada do centro urbano, como em áreas rurais. Muitas vezes, o uso ineficiente do espectro é ocasionado pela inatividade de um canal alocado à alguma transmissora, ou até mesmo se o seu funcionamento ocorrer apenas em determinada hora do dia, criando os *White Spaces*.

Os Espaços em Branco de TV, são, portanto, canais de TV não utilizados que são atribuídos à transmissão de televisão. O compartilhamento do espectro através de TVWS é o primeiro passo para o uso eficiente do espectro de forma oportunista e dinâmica.

A disponibilidade do espectro limita a capacidade de um sistema de comunicação, e, com isso, em algumas faixas de frequência e regiões geográficas, não há lugar para novos sistemas de rádio, pois a maioria das frequências adequadas já foram ocupadas. Sendo assim, o uso de dispositivos sem fio não licenciados em TVWS está ganhando espaço em todo o mundo como um meio para aumentar a utilização do espectro de bandas de TV. Reguladores ao redor do mundo liberaram ou preparam os quadros regulamentares para dispositivos sem fio sem licença operando em TVWS para regular esses dispositivos de espaço em branco (*White Space Devices* - WSDs). [7]

Para que os dispositivos de espaço em branco (WSDs) utilizem TVWS, uma das premissas é que não devem causar interferência nos usuários primários (*Primary Users* - PUs), cujo conceito é apresentado na próxima seção. Desta forma uma das abordagens mais comuns é o uso de bases de dados contendo as informações de canais livres, técnica conhecida como Banco de Dados de Espaço em Branco (*White Space Database* - WSDB). Embora os dispositivos dependam principalmente do WSDB, existem outros requisitos de instalação e funcionamento, como instalação fora do contorno protegido do usuário primário, auto-posicionamento, potência de transmissão, limites fora de banda, ciclo de atualização, que são parâmetros importantes a serem considerados.

A tecnologia TVWS tem sido uma grande promessa para o mundo em desenvolvimento, por trazer uma nova oportunidade para o uso de espectro não licenciado. Inicialmente, ela surgiu com o propósito de fazer melhor uso das bandas de guarda, ou espaços em branco, e agora é possível compreender que, por ser uma tecnologia de espectro secundária, pode aproveitar o espectro de televisão não utilizado de forma dinâmica. Alguns de seus grandes benefícios são a regulação de baixo risco, disponibilidade de espectro de televisão, uma grande tecnologia rural e oportunidade para empreendedorismo. [3]

A regulação de baixo risco se refere ao regulador. Não há necessidade de realocar o espectro para regular seu uso, porque o uso do espectro pelo WSD é secundário. Sendo assim, o regulador não é obrigado a distribuir uma faixa de espectro por anos e não expõe o governo aos desafios dos leilões de espectro.

Já a disponibilidade de espectro de televisão está ligada à escassez de canais de transmissão terrestre em uso em algumas regiões do mundo. A natureza flexível da

tecnologia TVWS comprova que mais espectro pode ser aproveitado nas áreas menos atendidas, o que não impede o uso do espectro da televisão para outros fins, como TV digital terrestre e banda larga móvel.

Com relação a ser uma grande tecnologia rural, deve-se pelas características de propagação e baixo custo de implementação. O acesso à Internet não está disponível em todas as regiões geográficas, e a situação é ainda mais escassa em áreas rurais ou fora das grandes áreas urbanas. Ainda há barreiras para as operadoras de telefonia móvel implantarem o acesso da tecnologia móvel em áreas rurais, onde a baixa renda e as populações esparsas são pouco atrativas economicamente para o estabelecimento e manutenção das estações rádio-base. O Brasil, por exemplo, por se tratar de um país com dimensões continentais, apresenta problemas relacionados à cobertura móvel, principalmente nas áreas rurais e remotas. Muitas pessoas que moram em regiões distantes dos centros urbanos não têm acesso à Internet e às comunicações móveis ou possuem um serviço precário e oneroso. O custo de implantação de infraestrutura cabeada é alto e soluções sem fio em frequências mais altas dificilmente são viáveis, devido à vegetação que intercepta a linha de visão [3]. Desta forma, o TVWS por utilizar banda do espectro UHF, que oferece características de propagação melhores do que outras tecnologias de acesso em banda larga, é uma tecnologia de grande potencial para cobrir grandes áreas. Logo, são necessárias poucas estações base para cobrir determinada área, já que cada estação possui longo alcance, e não há preocupação com torres altas, porque esta banda não requer linha de visada direta entre os rádios. Além disso, o custo dos dispositivos TVWS tende a ser menor do que o equipamento tradicional de banda larga sem fio, usado por operadoras de espectro licenciadas. Desta forma, TVWS se tornam uma opção relevante para conectividade rural, proporcionando mais espectro com boa faixa de cobertura, e, por consequência, menos investimento em infraestrutura de rede, impulsionando a diminuição de custos e viabilizando o acesso de qualidade aos serviços sem fio. [1]

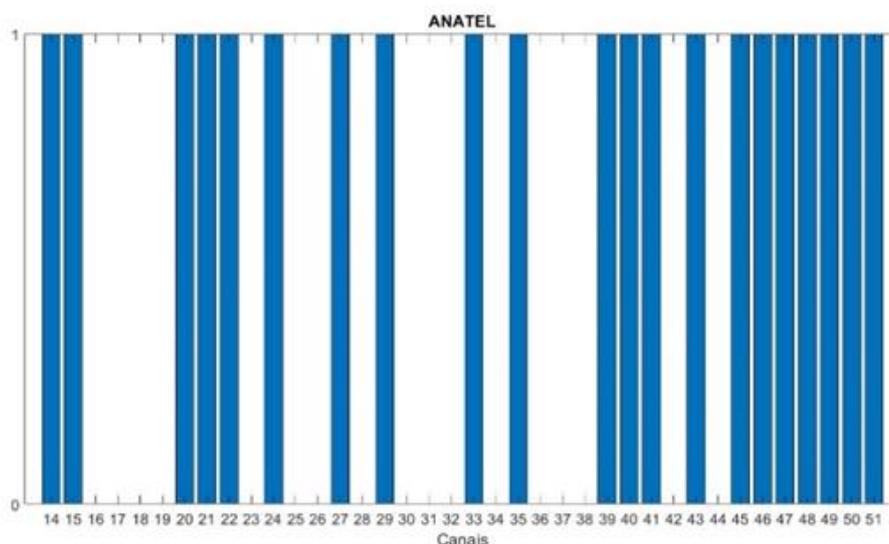
A tecnologia TVWS também pode abrir a entrega de serviços de banda larga rural para empresários interessados em fornecer serviços de banda larga competitivos locais, para pequenos empreendedores, que poderão ter novas oportunidades e até desafiar o domínio de mercados das operadoras estabelecidas. Isto porque hoje, a crescente demanda por espectro licenciado elevou muito o nível de entrada no mercado, assim como os riscos, ficando inviável para estes empreendedores menores.

Vários estudos vêm sendo realizados com o objetivo de detectar oportunidades do espectro. Em [2] foram realizadas medições no bairro de Icaraí, em Niterói, na faixa UHF da TV Digital. Neste trabalho, foram coletados dados em 50 pontos de medição, na região classificada como uma região densa urbana, como apresentado na figura 3. [2]

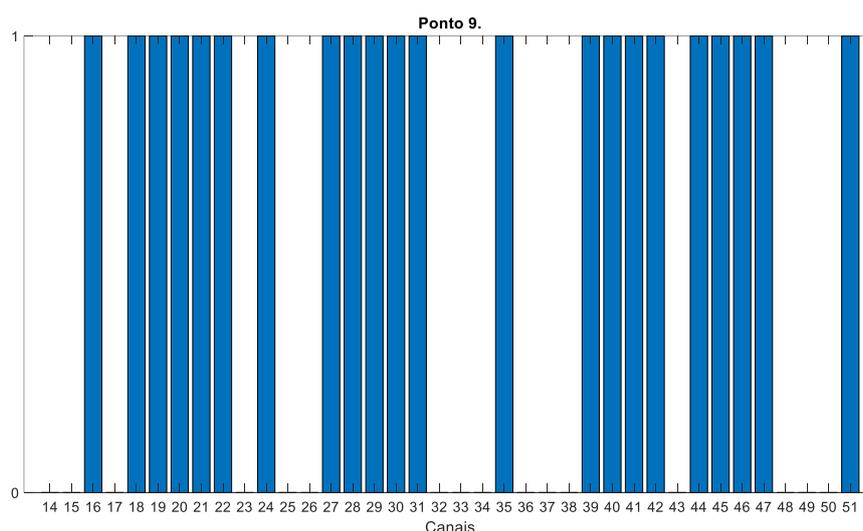


**Figura 3 - Mapa de medição em Icaraí. [2]**

A fim de comparar o plano de atribuição de frequências com os dados coletados, a figura 4 apresenta a alocação de canais por frequência outorgado pela Anatel e a figura 5 a medição realizada no ponto 9, que é ponto mais próximo do transmissor em relação aos outros pontos. A escolha do ponto 9 se deve à característica que neste ponto o sinal não é afetado por sombreamento das edificações degradando mais o sinal recebido. Na análise das medições foi utilizado como parâmetro de decisão um limiar de detecção [2] que define o estado de ocupado ou não em um canal de 6 MHz. Ao comparar os canais cadastrados na ANATEL como em operação, com os canais detectados através das medições, foi possível observar que os canais 14, 15, 33, 43, 48, 49, 50 estão licenciados para uso, porém não há recepção dos mesmos nesse ponto, produzindo um desperdício de 42 MHz de banda. Dessa forma, além dos canais sem alocação, são observados espaços em branco adicionais no espectro, que somente foram detectados através das medições.



**Figura 4 - Alocação de canais definido pela ANATEL para a faixa medida. [2]**



**Figura 5 - Canais classificados como ocupados através de dados medidos e utilizando como critério o limiar de detecção, no ponto 9. [2]**

Em [2] os autores analisaram novas oportunidades de espectro que são geradas pelas condições de propagação. Neste caso, novos espaços em branco locais são observados devido à degradação do sinal produto do somreamento ou pelas condições de recepção. Embora este tipo de análise tenha sido feito numa área urbanizada, pode ser observado que mesmo dentro de uma cidade de médio porte, oportunidades de espectro sejam estas por canais inativos ou por degradação do sinal podem ser encontradas. Um dos critérios para o uso dos espaços em branco na faixa UHF da TV Digital, é que seu uso esteja previsto para áreas rurais ou fora do contorno protegido das emissoras de TV. A partir deste estudo é

possível afirmar que nas áreas mais afastadas do perímetro urbano da cidade de Niterói, o comportamento observado nas medições irá se manter ou melhor ainda, novas oportunidades de espectro vão aparecer graças à degradação do sinal transmitido. Conforme falado anteriormente, ao analisar pontos mais afastados do transmissor é possível observar uma degradação do sinal recebido à medida que adentra nas regiões mais urbanizadas até se observar ausência do sinal mesmo em pontos externos. Desta análise podemos supor que no interior das edificações a ausência do sinal irá permanecer. Porém para poder afirmar tal suposição seria necessário realizar medições no interior das edificações.

Para a implementação de um sistema de comunicação que utilize os espaços em branco gerados na faixa da TV Digital, podemos concluir que é grande a possibilidade da coexistência das duas tecnologias se forem respeitados certos critérios como potência máxima de transmissão, emissões fora da banda do sinal, entre outros, a operar nos espaços em branco. Várias das regulamentações podem ser aplicadas no Brasil, entre elas a FCC (*Federal Communications Commission*) por terem o mesmo tamanho de canal de 6 MHz, porém pelos sistemas de TV Digital serem de tecnologias diferentes, será necessário realizar testes de convivência. [2]

### 3.2 Rádio Cognitivo

Com o passar dos anos, muitos desenvolvimentos foram feitos em aplicações sem fio, e a chegada do conceito do rádio cognitivo (RC) em 1999, possibilitou aproveitar os espaços em branco deixados pela alocação de canais. Atualmente, quase todos os aparelhos modernos, possuem conexões sem fio, isso faz com que aumente a necessidade de transmissão de dados por radiofrequência, e, conseqüentemente, as faixas de frequência estão saturadas na maioria dos países. Porém, apesar de pouco espectro livre, vários estudos comprovam que ele está subutilizado. Devido à alta demanda por espectro, as pesquisas em rádios cognitivos se intensificaram e se tornam muito importantes nos mercados nacional e internacional, já que eles são uma solução para a divisão do espectro de frequências entre os usuários sem licença. [8]

O conceito de Rádios Cognitivos foi introduzido pela primeira vez por Joseph Mitola III, em um seminário em 1998, no instituto de Tecnologia de Estocolmo, após introduzir os rádios definidos por Software em 1991, com Gerald Maguire. O rádio definido por *software* é aquele em que, em vez de circuitos eletrônicos, os parâmetros e configurações do sinal

transmitido é implementado e reconfigurável via *software*. Já os rádios cognitivos seriam uma evolução, utilizando o conceito de cognição, sendo capazes de identificar canais ociosos, utilizando-os de forma oportunista. [9] Dessa forma, os RCs, em conjunto com o uso de tecnologias inovadoras, surgem como uma maneira de mitigar o problema de eficiência de uso do espectro, que está escasso.

Existem diferentes definições de sistema de rádio cognitivo (CRS), mas a adotada para a maioria é da *International Telecommunication Union (ITU)*, que diz que o CRS é um sistema de rádio que emprega tecnologia que permite ao sistema capacidades cognitivas, reconfigurável e de aprendizagem [10]. A capacidade cognitiva é a capacidade de obter conhecimento de seu ambiente operacional e geográfico, políticas estabelecidas e de seu estado interno. A capacidade reconfigurável possibilita ajustar de forma dinâmica e autônoma seus parâmetros operacionais e protocolos de acordo com o conhecimento obtido para atingir os objetivos predefinidos. A de aprendizagem, está relacionada à capacidade aprender com os resultados obtidos.

Este sistema de rádio funciona de forma inteligente. Ele é um transmissor, capaz de estudar as transmissões disponíveis no ambiente e ajustar a própria frequência de transmissão sem causar interferência nos demais [10]. De forma dinâmica e autônoma, o RC é capaz de adaptar seus parâmetros e protocolos operacionais, aprender com sua experiência anterior, buscar frequências disponíveis e tomar a decisão de qual faixa de frequências utilizar sem interferir as que estão em uso. [8]

O rádio cognitivo pode ser utilizado no acesso oportunista de rádio ou espectro oportunista, reutilizando o espectro licenciado, de maneira temporal, espacial e geográfica. Neste contexto, existem dois tipos de usuário que desejam utilizar o espectro: o usuário primário (PU) e o usuário secundário (SU). O PU é aquele usuário ou sistema que detém o uso de uma faixa de frequências que foi alocada através de uma agência reguladora. O secundário ou cognitivo é aquele que pode acessar e utilizar um canal vago, desde que não cause interferência no sistema primário. Sendo assim, o RC aloca a um usuário secundário não licenciado um espaço em branco, espectro licenciado, que opera sem causar interferência nos usuários primários. Com isso, o espectro está sendo usado de forma mais eficiente. Para realizar esta alocação, o sistema de rádio cognitivo analisa determinada faixa de frequência, verifica os canais que estão livres para uso, seleciona o canal mais adequado para a transmissão através do gerenciamento espectral, permite o compartilhamento do acesso ao canal com outros usuários e, caso o canal primário seja ativo, realiza a migração para outro

canal livre sem perder a comunicação, podendo utilizar os canais sem gerar impacto nos primários. [11]

Surgiram diversos padrões na área de comunicações sem fio, incluindo como solução potencial o compartilhamento de espectro. Um exemplo desses padrões é o padrão IEEE 802.22. Iniciado em 2004, foi o primeiro padrão para Área Regional de Rede sem fio (WRAN - *Wireless Regional Area Network*) a operar em bandas de TV. Sua proposta foi baseada nas orientações da FCC, que indicava que os canais de TV não utilizados poderiam ser usados para acesso de banda larga fixa. Em suas especificações, transmissores de rádio não licenciados teriam a permissão de operarem no espectro de transmissão de televisão, nos canais não utilizados, não interferindo outros canais. [12] O padrão usa técnicas de rádio cognitivo para utilizar o espaço em branco da TV (TVWS), voltado para conectividade de áreas rurais, garantindo a não interferência aos operadores históricos, como transmissão de TV e microfones sem fio. [13]

As principais agências reguladoras do mundo estão desenvolvendo regras para a utilização não licenciada de TVWS, como a FCC nos Estados Unidos, o *Office of Communications* (Ofcom) no Reino Unido e o *Electronic Communications Committee* (ECC) da CEPT (*European conference of postal and telecommunications services*) na Europa, e serão mostrados a seguir. [7]

# Capítulo 4 - Regulamentações de TVWS no mundo

## 4.1 Regulamento ao redor do mundo

Muitos trabalhos vêm sendo realizados ao longo do tempo para comprovarem a ociosidade do espectro de frequência no mundo. Isto significa que, apesar do espectro estar alocado para determinados serviços e, com isso, estar quase completamente ocupado e sem espaço para novas alocações, ele também está sendo subutilizado em alguns canais dependendo da sua localização geográfica ou do horário.

No ano de 2009, foi publicado um estudo sobre a área metropolitana de Barcelona, na Espanha, para a faixa de frequências 75 Hz a 3 GHz. Através de medições do espectro, conclui-se que a faixa estava sendo utilizada de maneira ineficiente na região, revelando que algumas faixas de frequência bastante usadas e outras pouco usadas. [14] [15]

Um outro estudo foi apresentado em 2011 sobre a ocupação do espectro eletromagnético na cidade de Chicago, nos Estados Unidos. A faixa de 30 MHz – 3000 MHz foi analisada nos três anos anteriores: em 2010 a ocupação média do espectro foi de 14%, em 2009 foi de 15%, e em 2008 apresentou ocupação de 18%. Dessa forma, foi concluído que o espectro tinha uma ocupação global média atemporal, ou seja, se manteve praticamente constante ao longo dos anos. [16] [17]

Esses são alguns exemplos que confirmam a análise feita pela FCC, que demonstrou que grande parte do espectro licenciado está sendo pouco utilizada. Algumas frequências são muito utilizadas em determinada hora do dia, em determinado local geográfico, enquanto outras permanecem praticamente sem utilização na maioria do tempo. Essa variação nas faixas de frequência é a grande motivadora para a reutilização do espectro através de Rádios Cognitivos.

Sendo assim, as principais agências reguladoras do mundo estabelecem regras para TVWS e para o funcionamento do Rádio Cognitivo, através de normas feitas pelos organismos ITU (*International Telecommunication Union*), IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e ECMA (*European Computer Manufacturers Association*), para auxiliar e facilitar o

desenvolvimento e a implantação da tecnologia de RC, visando aumentar a eficiência do uso do espectro eletromagnético. [16]

Para utilizar os Espaços em Branco de TV, os dispositivos WSDs devem implementar técnicas que não causam interferência excessiva nos usuários primários (PUs). Dentre estas técnicas, é possível citar algumas como sensoriamento de espectro, beacon e Banco de Dados de Espaço em Branco (WSDB), onde cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens, dependendo das características de cada cenário. [7]

Com a finalidade de analisar as diferentes tecnologias e identificar a mais adequada para TVWS, a FCC conduziu uma série de testes. O primeiro teste ocorreu em 2007, onde o sensoriamento de espectro não apresentou resultados satisfatórios em relação à precisão e confiabilidade na detecção de PUs [7]. Já no ano seguinte, o relatório da FCC apontou que a capacidade de detectar e evitar transmissões de PUs foram muito bem desempenhados nos protótipos de TVWS, Motorola e Philips, apresentados por Adaptrum, *Institute for Infocomm Research* (I2R).

Entretanto, a decisão final da FCC foi que as tecnologias de detecção de espectro ainda estariam pouco confiáveis. Sendo assim, em 2010 a FCC estabeleceu as regras para TVWS, que são ajustadas várias vezes posteriormente, através do Memorando de Opinião e Ordem, definindo Banco de Dados de Espaços em Branco (WSDB) como o principal método para determinar TVWS vago. Além dos Estados Unidos, Cingapura, Canadá e Nova Zelândia, outros países lançaram seus projetos de normas e regulamentos para TVWS, onde WSDB permanece sendo a principal escolha para determinar os Espaços em Branco de TV. [7]

Com respeito às normas que podem ser utilizadas nas faixas de frequência, podemos citar o protocolo IEEE 802.11af, informalmente conhecido como White-Fi ou Super Wi-Fi [3], que é uma modificação do padrão IEEE 802.11, e essa alteração possibilita o protocolo operar em *White Space*. Uma particularidade desta tecnologia é que na arquitetura do padrão 802.11af, há dois cenários possíveis, o cenário outdoor, com área de cobertura de, aproximadamente, até 5 km, dependendo das condições do enlace configurado, um segundo cenário é o indoor cuja cobertura pode vir a alcançar até 100 m. Este segundo cenário seria de grande valia para descongestionar a já saturada rede WLAN operando em 2,4 GHz e 5,8 GHz. Um segundo protocolo candidato a operar nos espaços em branco na faixa da TV Digital é o IEEE 802.22. O padrão IEEE 802.22 define um sistema para uma rede sem fio de área regional (WRAN) que utiliza os espaços em branco dentro da faixa do serviço de

televisão ocupando as frequências que vão de 54 MHz a 862 MHz. O objetivo principal do desenvolvimento do protocolo IEEE 802.22 é fornecer acesso de banda larga sem fio em áreas rurais ou com baixa densidade populacional. Esse padrão utiliza mecanismos que permitem a usuários primários e secundários coexistirem na faixa de TV, de maneira que não haja interferência.

Além do principal requisito já citado, Base de Dados de Espaço em Branco (WSDB), outros parâmetros também são importantes a serem considerados na implantação dos aplicativos TVWS, como contorno de proteção, autoposicionamento, limites fora de banda (OOB), ciclo de atualização, já que esses fatores podem variar de acordo com o país. É fundamental analisar as regulamentações ao redor do mundo e compará-las para a prospecção de aplicativos TVWS. [7]

### **4.1.1 Estados Unidos da América (EUA), FCC**

Em relação às Regulamentações de TVWS pelo mundo, no ano de 2004 [7], a *Federal Communications Commission* (FCC) dos EUA propôs que dispositivos não licenciados operassem em Bandas de TV em trechos que não estejam sendo usados, tornando-se o primeiro regulador do mundo a realizar tal proposta. Isto poderá levar ao desenvolvimento de novos serviços ou aumentar a gama de serviços existentes, por causa do uso mais eficiente do espectro. No mais recente desenvolvimento, ocorre o leilão de incentivo, onde as emissoras de TV serão pagas caso permitam que alguns de seus espectros sejam leiloados por serviços sem fio licenciados, e isso irá afetar o espectro disponível para WSDs. Dentro da parametrização do sistema TVWS, a FCC classifica os WSDs em duas categorias principais, de acordo com a sua localização, que são dispositivos fixos e dispositivos portáteis pessoais. [18] [19]

Algumas definições estipuladas sobre os dispositivos WSD fixos foram que: os dispositivos utilizassem a EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) máxima de 4 W, possuíssem localizações fixas, pudessem operar em locais mais próximos dos contornos de proteção dos UPs e a cada 20 minutos deveriam acessar o WSDB pelo menos uma vez para determinar a disponibilidade das bandas de TV.

De acordo com a FCC, as frequências disponíveis para espaços em branco são 54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz, 470-698 MHz [11] [20]

Em relação aos dispositivos portáteis estipulou-se que eles pudessem operar em até 100 mW de energia, exceto quando estivessem dentro dos contornos de proteção de um canal de transmissão de TV adjacente, onde o limite diminuiria para 40 mW. Além disso, existe uma especificação quando se trata de WSDs pessoais, que são as subcategorias, nomeadas dispositivos Modo I, Modo II e somente sensores.

Os dispositivos pessoais Modo I precisam ser controlados por dispositivos fixos ou Modo II, porque não possuem a capacidade de determinar os canais disponíveis. Eles precisam receber sinais desses outros dispositivos pelo menos uma vez por minuto para garantir a continuidade da disponibilidade do canal. Já os dispositivos Modo II, são capazes de determinar os canais disponíveis em seus locais de maneira independente. Sendo assim, eles precisam verificar repetidamente seus locais pelo menos uma vez a cada minuto e, caso eles se movam mais de 100 m, também é necessário determinar novamente os canais disponíveis. Pelo menos uma vez a cada 20 minutos estes dispositivos Modo II precisam acessar o WSDB para determinar a disponibilidade das bandas de TV, mesmo que elas não tenham se movido mais do que 100 m. [7]

Em 2010, a FCC decidiu que tanto os dispositivos fixos quanto os dispositivos Modo I e Modo II não necessitam de detecção de espectro, e requerem apenas acesso ao WSDB para determinar a disponibilidade dos canais de TV. Os dispositivos apenas de detecção podem operar com até 50 mW de potência, porém, eles devem ter a habilidade de detectar sinais de televisão em -114 dBm e sinais de microfone sem fio em -107 dBm pelo menos uma vez a cada minuto. [21]

### **4.1.2 Reino Unido (UK), Ofcom**

Foi anunciado pelo Ofcom (*Office of Communications*), regulador do Reino Unido, uma Revisão de Dividendos Digitais em 2005 [7] para examinar o uso do espectro de TV após a transição de TV analógica para digital, já que esta ação irá liberar grande quantidade de espectro para novos serviços. Em 2009, o órgão regulador declarou os parâmetros técnicos dos WSDs, indicando que estes dispositivos determinarão a disponibilidade de espectro por detecção e/ou WSDB com WSDB como o método mais importante a curto e médio prazo.

Os dispositivos WSDs, então, podem ser classificados pelo Ofcom em duas categorias principais: mestre e escravo. A topologia mestre-escravo é uma combinação de

sensoriamento e acesso ao banco de dados de geolocalização. Neste contexto, existem dois dispositivos de espaço em branco de TV (TVWSD) a serem considerados, os dispositivos mestres, que obtêm um conjunto de frequências disponíveis em sua área através de um banco de dados (WSDB), e os dispositivos escravos, que não podem entrar em contato com o banco de dados, mas recebem as informações relevantes dos dispositivos mestres. Dentre outras características, quando houver uma solicitação dos WSDs principais um WSD escravo deve sempre parar a operação ou se ele não receber uma resposta dos WSDs principais em 5 segundos. [22]

Os WSD precisam comunicar ao banco de dados de geolocalização algumas informações relevantes, como a localização, a precisão de localização, a área de operação esperada (opcional) ou área de cobertura, o tipo de dispositivo, e, no caso de uma configuração WSD mestre-escravo, o mestre WSD irá solicitar a seus escravos associados estas informações ou irá obtê-las através de outro meio confiável.

Por fim, o banco de dados de geolocalização deverá comunicar ao WSD informações técnicas como frequências disponíveis, potência máxima de transmissão e o banco de dados nacional ou regional apropriado para consultar.

### **4.1.3 Europa, CEPT**

O Comitê de Comunicações Eletrônicas (ECC) da Conferência Europeia das Administrações de Correios e Telecomunicações (CEPT) divulgou, em 2011 [7], um relatório sobre os requisitos técnicos e operacionais sistemas de rádio cognitivos na TVWS. Concluindo que apenas a detecção é pouco confiável para garantir a proteção dos receptores digitais de Televisão Terrestre Digital (TDT) e o PMSE e WSDB é o método mais viável ou combinado com a detecção.

A implementação de WSDs será baseada na arquitetura mestre e escravo, semelhante à proposta pelo Ofcom.

### **4.1.4 Colômbia, ANE**

No ano de 2017 [9], através da Agência Nacional do Espectro (ANE), entidade responsável pelo gerenciamento e administração do espectro, a Colômbia foi o primeiro país

a emitir a regulamentação que estabelece as condições de uso dos dispositivos de espaço em branco da TV na América do Sul. Na resolução é especificado que o espectro livre alocado para o serviço de TV na faixa que vai de 470 MHz a 698 MHz possa ser utilizado para fornecer conectividade em áreas rurais e até permite a implementação da tecnologia IOT (*Internet of Things*), ou internet das coisas. A regulamentação definida segue o modelo definido pela FCC e parâmetros técnicos e operacionais para o uso dos referidos espaços, a fim de evitar interferências com outros serviços. [10]

Apesar das novas oportunidades que surgem com a resolução, existem desafios na sua gestão e regulação, em termos de mecanismos de controle de dispositivo TVWS. Sendo assim, foi desenvolvida uma rede mestre-escravo com rádios SDR configuráveis e utilizando software Python. [11] [20]

Desde 2011 vários pilotos e experiências foram lançados ao redor do mundo para dar suporte a futuros serviços digitais. [23] A maioria deles foi endossada por organizações globais da Internet, como a Microsoft ou o Google, ressaltando diferentes aspectos. Muitos países participaram de pilotos, provas de conceito, desenvolvimentos iniciais para comparar o TVWS como uma solução de banda larga móvel econômica, e, dentre eles, a Colômbia.

Um dos testes realizados na Colômbia, foi utilizado TVWS para fornecer serviço a escolas remotas. Foi analisado que em 2012 apenas 9,4% das residências rurais tinham acesso à Internet e o governo estava procurando alternativas acessíveis do que os meios tradicionais, como fibra, comunicações móveis ou satélite. Então, em maio de 2016, TVWS iniciou na Colômbia, com um grande incentivo do governo central e com um acordo com a Microsoft. O principal foco foram as áreas rurais, para fornecer acesso de banda larga a comunidades mais remotas. As escolas nessas áreas foram os pontos de conexão da rede. E, além da educação, também foram incluídos no programa as áreas de saúde, prosperidade social, serviços em nuvem e empreendedorismo. [23]

A infraestrutura implantada utilizou a abordagem de banco de dados de geolocalização, os resultados foram muito satisfatórios e comprovaram a usabilidade de oportunidades espectrais nas bandas de TV. A disponibilidade do espectro na região rural da Colômbia foi um dos principais motivadores para escolher o TVWS, já que apenas 10 dos 48 canais disponíveis são usados para serviços de TV. [24]

A ANE destacou três pilotos que foram realizados através de uma ação conjunta de partes públicas e privadas, como Ministério da Educação, Autoridade Nacional de TV,

Mintic e corporações Microsoft e Azteca: os pilotos em Caldas (Aguadas), La Guajira (Dibulla) e Norte de Santander (Pamplonita).

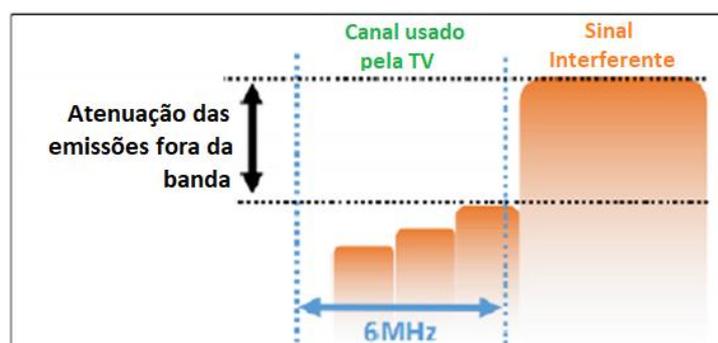
A seguir são apresentadas as principais características da parametrização dos países ou comitês apresentados anteriormente:

## 4.2 Aspectos técnicos

No regulamento do TVWS foram contemplados uma série de parâmetros importantes que podem variar de acordo com os diferentes territórios em que se encontram, como por exemplo a proteção do contorno, limites fora da banda (*Out Of Band – OOB*), posicionamento, ciclo de atualização, entre outros.

Alguns aspectos técnicos foram considerados na regulação de diferentes países na implantação de um sistema TVWS, e são importantes de serem mais profundamente detalhados: as atenuações para emissões fora de banda, EIRP máximo, a restrição do DEP (*Power Spectral Density*) e o HAAT (*Height Above Average Terrain*).

Dependendo da localização geográfica, mais especificamente o país em que esteja sendo feita a análise, e dependendo principalmente do tipo de dispositivo que seja utilizado, já que a regulamentação nos países contemplava dispositivos fixos e portáteis, entre outros, as atenuações para emissões fora de banda podem variar. Todas as potências de atenuação são fornecidas em unidades de dB.



**Figura 6 - Atenuações de emissão fora de banda. Recuperado de (ANE, 2017)**

A EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) é a potência isotrópica irradiada efetiva, é um parâmetro de transmissão que consiste na soma da potência de transmissão, incluindo o ganho da antena e subtraindo as perdas no cabo.

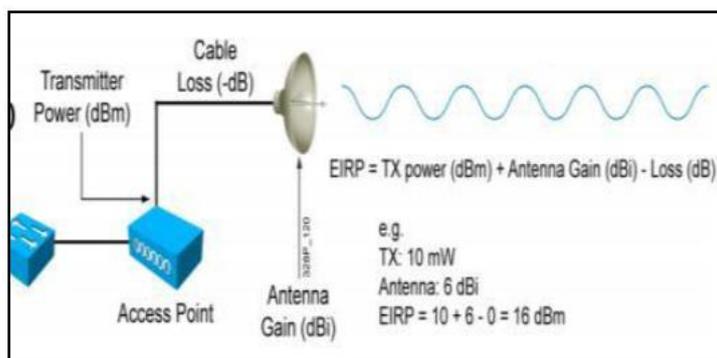
Abaixo está definida a equação da EIRP: [25]

$$EIRP = P_t + G - p \text{ onde,}$$

$P_t$ : potência do transmissor [dBm]

G: ganho da antena [dBi]

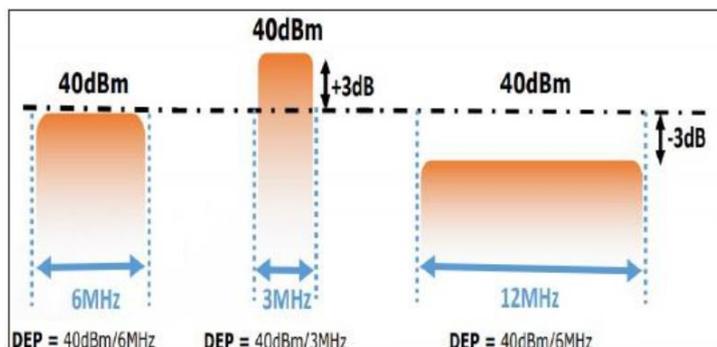
p: perda nos cabos [dB]



**Figura 7 - Definição de EIRP. Recuperado de (Henry, 2014)**

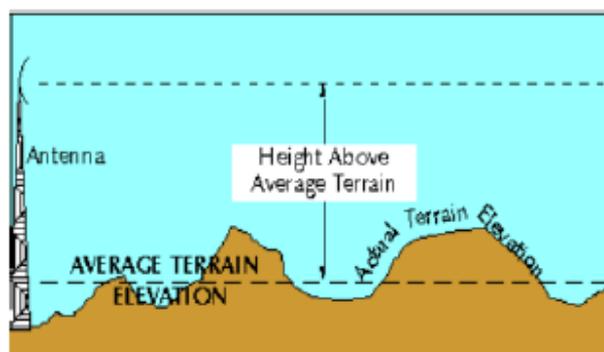
A ANATEL permite que a potência máxima na saída do transmissor (EIRP) para a faixa de frequência de 2,4 GHz é de no máximo 36 dBm (4000 mW). [20]

Outra restrição diz respeito ao limite em relação à DEP, ou densidade espectral de potência. Ela apresenta a potência média na largura de banda de referência. É possível que o espectro de um sinal tenha a mesma potência, porém, com diferentes larguras de banda, como ilustrado na figura abaixo:



**Figura 8 - Exemplos de DEP. Recuperado de (ANE, 2017)**

Por fim, o HAAT é a altura acima do terreno médio, como mostrado na figura abaixo. Foi definido que para todos os países o valor do HAAT seria de 250m, com exceção do Reino Unido e Colômbia. Para o Reino Unido, a altura onde as antenas se localizam não deve ser considerada, porque não interfere na análise. Já para a Colômbia, o valor estabelecido pela ANE para o HAAT é de 800 m. [11]



**Figura 9 - HAAT.**

**Tabela 3 - Aspectos técnicos da regulamentação [11].**

Localidade	EIRP Máxima	Restrição da DEP	Atenuações para emissões fora de banda	HAAT Máximo
EUA	36dBm 40dBm com espectro suficiente	30dBm/6MHz 40dBm/6MHz	>- 42,8dBm/100KHz >55,4dB/6MHz	250m
Canadá	36dBm	30dBm/6MHz	>- 42,8dBm/100KHz >55,4dB/6MHz	250m
Reino Unido	36dBm	30dBm/8MHz	Dispositivo Classe5>43dB Classe4>54dB Classe3>64dB Classe2e1>74dB	Não importa a altura
Finlândia	20dBm	20dBm/8MHz	- 84dBm/100KHz	250m
Alemanha	40dBm	40dBm/8MHz	- 84dBm/100KHz	250m
Cingapura	36dBm	30dBm/8MHz	17dBm/100KHz	250m
Nova Zelândia	10dBw	21dB/8MHz	-36,8dBm/100KHz -56,8dBm/100KHz -52,8/100KHz	250m
Colômbia	40dBm	40dBm/6MHz	>55,4dB/6MHz	800m

**Tabela 4 - Frequências disponíveis para espaços em branco [20]**

País	Entidade Reguladora	Frequências disponíveis para espaços em branco
Europa	CEPT	470-790
África do Sul	ICASA	470-694 Excluindo a sub-banda 606-614
Alemanha	BNetzA	470-790
Austrália	ACMA	470-698
Canadá	Indústria Canadá	54-72 76-88 174-216 470-608 614-698
Colômbia	ANE	400-698
Estados Unidos	FCC	WSDs fixos: 54-72 76-88 174-216 WSDs fixos e portáteis: 470-698*
Finlândia	FICORA	470-790
Japão	NICT	470-710
Quênia	CA	470-694
Malawi	MACRA	470-694
Nova Zelândia	RSM	470-790
Reino Unido	Ofcom	470-550 614-790
Cingapura	IDA	181-188 209-223 614-622 630-710 718-742 750-774 790-806
Vietnã	ARFM	470-790

Realizando uma comparação de regulamentação na faixa de frequência TVWS, pode-se ver que as faixas de frequência são semelhantes para países da mesma região, e que as faixas de frequências TVWS dos EUA, Canadá e Cingapura são muito amplas e abrangem de VHF a UHF, enquanto na Europa e na Nova Zelândia, as faixas de frequência da TVWS são apenas na UHF. Em relação ao número de canais, o espectro total de TVWS disponível na América do Norte e na Europa é bastante próximo, sendo difícil concluir se Cingapura

tem um espectro TVWS mais ou menos disponível em comparação com a América do Norte e a Europa. A Nova Zelândia tem um pequeno número de canais TVWS disponíveis, já que estes são reservados para testes. E, a largura de banda do canal é consistente com a largura de banda atual usada pela transmissão de TV.

### 4.3 Perspectiva do Brasil

O uso ineficiente do espectro destinado ao serviço de televisão, identificado neste trabalho como *White Space* foi o que permitiu criar as metodologias de como acessar o espectro, porém para poder ser implementado, há vários parâmetros como diferentes potências, diferentes bandas, diferentes alturas de antenas receptora e transmissora, que são definidas por cada país de acordo com as suas características. Através da análise de algumas dessas características, é possível inferir as metodologias que se enquadram melhor ao cenário brasileiro.

No Brasil, a faixa que estaria disponível para Espaços em Branco é a VHF, de 54 a 72 MHz e 174 a 216 MHz, e a UHF, de 470 a 608 MHz e 614 a 698 MHz. Nos EUA, a FCC, definiu as frequências disponíveis para espaços em branco como 54 a 72 MHz, 76 a 88 MHz, 174 a 216 MHz, 470 a 698 MHz. De acordo com a ANE, na Colômbia, as frequências disponíveis para espaços em branco são de 400 a 698 MHz. EUA, Colômbia e Brasil utilizam 6 MHz como largura de banda. Para os EUA, a EIRP máxima é de 36 dBm ou 40 dBm com espectro suficiente, para a Colômbia é de 40 dBm. [20]

EUA:

- De acordo com a FCC, as frequências disponíveis para espaços em branco são 54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz, 470-698 MHz
- EIRP máxima: 36dBm ou 40dBm com espectro suficiente
- Restrição do DEP: 30dBm/6MHz ou 40dBm/6MHz
- Atenuações para emissões fora de banda: >- 42,8dBm/100KHz ou >55,4 dB/6MHz
- HAAT máximo: 250m

COLÔMBIA:

- De acordo com a ANE, as frequências disponíveis para espaços em branco são 400-698 MHz.
- EIRP máxima: 40dBm

- Restrição do DEP: 40dBm/6MHz
- Atenuações para emissões fora de banda: >55,4 dB/6MHz
- HAAT máximo: 800m

Recentemente, no dia 6 de outubro de 2021, foi publicado, pela Anatel, a Resolução número 747 sobre as condições de uso em faixa VHF e UHF de TV para Espaços em Branco. Ela atribui e destina faixas de radiofrequências de TV e aprova o Regulamento sobre Condições de Uso das Faixas de Radiofrequências de 54 MHz a 72 MHz, 174 MHz a 216 MHz, 470 MHz a 608 MHz e 614 a 698 MHz por Dispositivos de Espectro Ocioso ou, como também é chamado, o Regulamento de TV *White Spaces*.

Foi definido que a potência de pico máxima do Dispositivo de Espectro Ocioso, medida na saída do transmissor, não pode ser superior a 1 W, ou 30 dBm. Quanto aos outros parâmetros, como limites para emissões fora de faixa e de espúrios, condições técnicas adicionais para operação, e condições para proteção do serviço de radiodifusão, até o momento, ainda não foram estabelecidas, mas serão definidos por Ato da Superintendência responsável pela administração do uso do espectro de radiofrequências. [26]

Por causa de todas essas características em comum com o Brasil, foram selecionadas as metodologias dos EUA e da Colômbia para realizar simulações, através do SEAMCAT, e analisar os resultados.

# Capítulo 5 - Seamcat

## 5.1 Introdução

Foi mencionado anteriormente que, pelo aumento da quantidade de serviços e da demanda de dados, o espectro de frequências está se tornando escasso e, por isso, há a necessidade de utilizá-lo de forma mais eficiente, através de análise e planejamento, assegurando a compatibilidade entre os sistemas de rádio localizados em bandas de frequência adjacentes ou, até mesmo, sobrepostas. Para que estas situações sejam viáveis, é importante analisar a relação entre os sistemas que podem realizar interferência entre si.

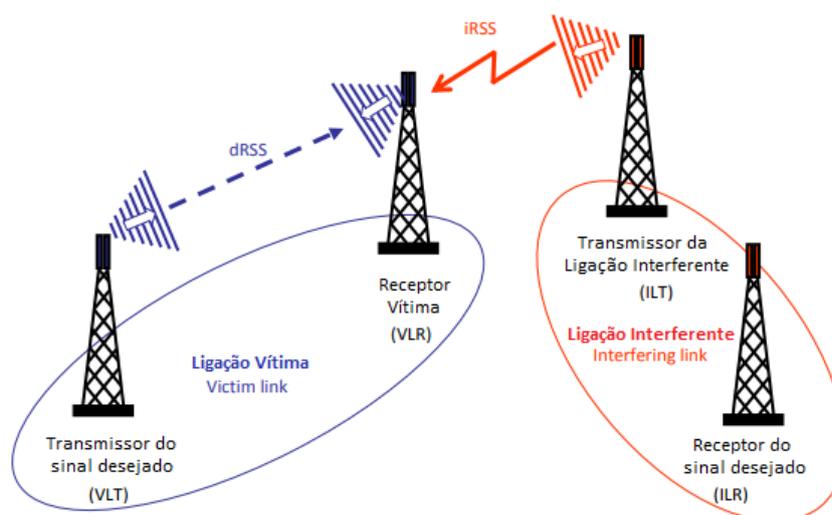
Com o objetivo de realizar esta análise, levando em consideração diferentes parâmetros, foram feitas simulações utilizando o SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*), que é um modelo de simulação estatística, desenvolvido pelo CEPT (*The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*), e que utiliza o método de análise de Monte Carlo para avaliar a potencial interferência entre diferentes sistemas de radiocomunicação como transmissão ponto-a-ponto, redes móveis, satélites, entre outros. Este simulador considera vários eventos independentes, que são utilizados para calcular a probabilidade de interferência entre os sistemas e verificar se está acima dos limites aceitáveis dentro das condições determinadas. [27]

O simulador foi projetado para investigar diferentes cenários, recriá-los e reconsiderá-los, de acordo com parâmetros de entrada indicados pelo usuário. Alguns exemplos de cenários podem ser os estudos de compartilhamento e compatibilidade de diferentes equipamentos operando na mesma faixa de frequências ou adjacentes, avaliação do impacto do uso de diferentes sistemas de transmissão e recepção de máscaras e avaliação dos limites aplicados para emissões indesejadas, produtos de bloqueio ou intermodulação. Desta forma, o SEAMCAT atende bem aos objetivos da análise que foi proposta neste trabalho.

## 5.2 O Simulador

No SEAMCAT, o usuário pode definir os parâmetros de propagação das ligações de sistema interferente e sistema vítima, e também a distribuição dos possíveis parâmetros para os sistemas envolvidos, como, por exemplo, a posição do móvel. O simulador utiliza quatro elementos básicos em suas simulações, sendo eles o Transmissor do sinal desejado (VLT – *Victim Link Transmitter*), o Receptor do sinal desejado (VLR – *Victim Link Receiver*), o Transmissor do sinal interferente (ILT – *Interference Link Transmitter*) e o Receptor do sinal interferente (ILR – *Interference Link Receiver*).

O receptor do sistema vítima (VLR) recebe o sinal desejado (*dRSS - desired Received Signal Strength*), enquanto o transmissor interferente (ILT) gera uma intensidade de sinal interferente (*iRSS - Interfering Received Signal Strength*). Os enlaces entre os dois sistemas podem ser vistos na figura abaixo.



**Figura 10 - Enlace dos sistemas vítima e interferente. [28]**

O transmissor da ligação vítima e o receptor da ligação vítima compõem a "ligação vítima" e o transmissor da ligação de interferência e o receptor da ligação de interferência compõem a "ligação interferente". Com o objetivo de estudar a relação de interferência entre um dispositivo de espaço em branco (WSD), como o sistema LTE, e o sistema digital de televisão (DTV), primeiramente foi preciso definir o sistema que seria utilizado como vítima. Neste trabalho, será analisado o DTV como o sinal desejado e, portanto, o sistema vítima, e o WSD, sendo o sistema interferente.

O simulador modela um receptor de ligação vítima único (VLR) conectado a um transmissor de ligação vítima (VLT) operando entre um conjunto de uma ou mais ligações interferentes. Esses interferentes podem pertencer ao mesmo sistema da vítima, a um sistema diferente ou a uma mistura de ambos. As posições das interferências são distribuídas ao redor da vítima, de maneira aleatória ou conforme as especificações do usuário.

A técnica de Monte Carlo, utilizada pelo SEAMCAT, considera muitos instantes independentes no tempo ou no espaço, onde, para cada evento simulado, vários parâmetros são inseridos para criar um novo cenário como, a posição do interferente com relação à vítima, a intensidade do sinal desejado, canais que a vítima e o interferente estão usando, entre outros. [28] Com isso, é possível gerar a probabilidade de interferência entre os sistemas de rádio e obter uma confiabilidade estatística no resultado.

## 5.3 Interferência

Existem quatro critérios de interferência que são considerados no SEAMCAT: razão sinal interferência ( $C/I$ ), razão sinal interferência-mais-ruído ( $C/(I + N)$ ), dessensibilização ( $(N + I)/N$ ) e razão interferência ruído ( $I/N$ ). A interferência ocorre quando  $C/I$  do receptor do sistema vítima (VLR) é menor do que o valor mínimo permitido para que haja uma boa recepção do sinal transmitido. Sabendo a intensidade do sinal desejado (dRSS) e do sinal interferente (iRSS), é possível calcular a razão  $C/I$ , conforme a figura abaixo. [28]

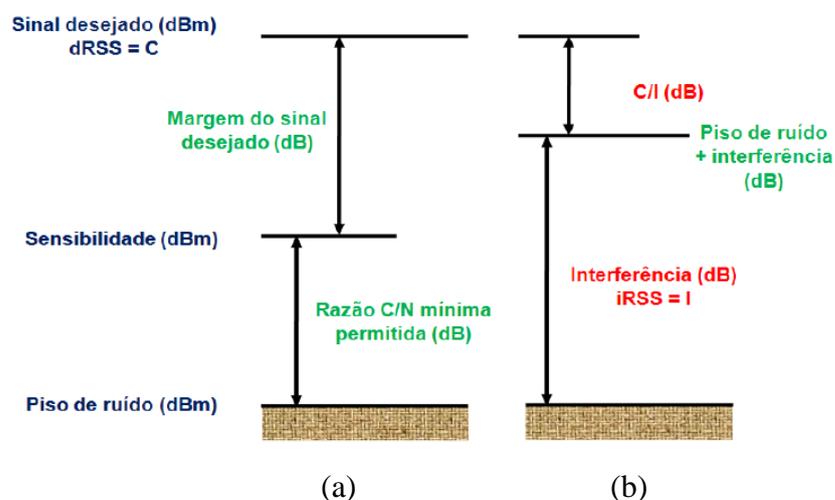


Figura 11 - Níveis de sinal usados para determinar a presença ou ausência de interferência. [29]

Através da ilustração acima, é possível analisar o efeito da interferência no sinal desejado. A figura 11.a representa a situação em que a vítima está recebendo o sinal desejado com uma margem e sem interferência. Esta margem indica que ainda há certa tolerância para que o sinal seja recebido, mesmo que haja alguma intervenção. Esta figura mostra o piso de ruído, que é a medida de todos os sinais indesejados dentro de um sistema de medição, o nível de sensibilidade, que é o menor nível de sinal que o receptor consegue distinguir do ruído, e o sinal desejado, que será recebido pela vítima. Logo, o nível de sinal recebido pela vítima é dado pela soma da sensibilidade com a margem de sinal desejado.

Quando há interferência no sinal desejado, pode acontecer o que está sendo representado na figura 11.b. A interferência se adiciona ao piso de ruído, sendo este, então o nível do sinal interferente. Sendo assim, é determinada a razão  $C/I$ , que é justamente a diferença entre a intensidade do sinal desejado e o sinal interferente. A interferência no sinal só poderá ser suportada caso a razão  $C/I$  seja maior que a razão  $C/N$  (relação entre sinal desejado e ruído do canal) mínima necessária. [28] A simulação por Monte Carlo verifica esta condição e indica a presença ou ausência da interferência.

Abaixo é apresentada a expressão de probabilidade de interferência (IP):

$$IP = 1 - P_{NI}$$

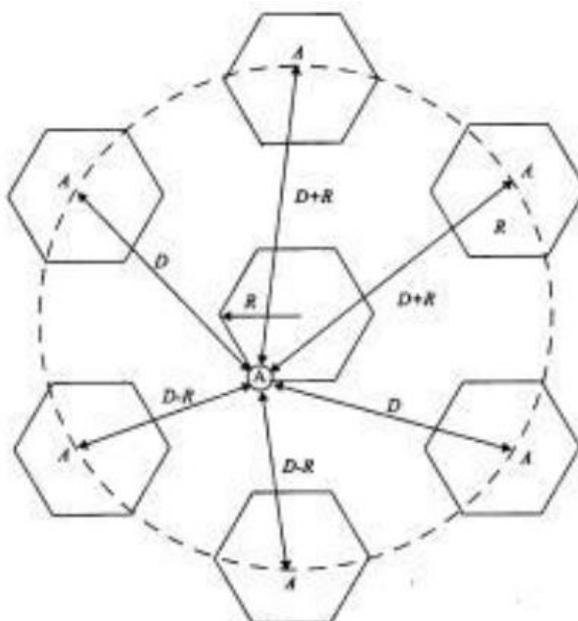
$$P_{NI} = P\left(\frac{dRSS}{iRSS_{comp} + N} > \frac{C_m}{I + N}, dRSS > sens\right)$$

$P_{NI}$  é a probabilidade de não interferência, e sua expressão diz que para não haver interferência, a relação sinal-ruído deve ser maior que a relação sinal-ruído mínima para o sistema funcionar, e que o sinal desejado recebido deve ser maior que o nível de sensibilidade.

É compreensível que a interferência seja um parâmetro tão importante para ser levado em consideração em qualquer situação, justamente por limitar o desempenho dos sistemas móveis. Outro ponto de atenção é a maneira com que a interferência pode ser provocada, através de fontes internas e externas. Uma fonte interna é aquela através de uma estação móvel da mesma célula, chamadas em andamento nas células vizinhas ou estações-base operando na mesma faixa de frequência, onde as frequências no sistema são reutilizadas. Já a fonte externa é a que irradia energia de forma indevida para a faixa de frequência destinada para a telefonia.

## 5.4 Interferência Co-canal

A técnica de reutilização de frequências tem o propósito de aumentar a eficiência espectral e consequentemente a capacidade do sistema. A interferência co-canal surge devido a esse reuso, que é a possibilidade da utilização das mesmas frequências por parte de vários usuários do mesmo sistema em diferentes regiões geográficas [30].



**Figura 12 - Distância entre as células co-canal**

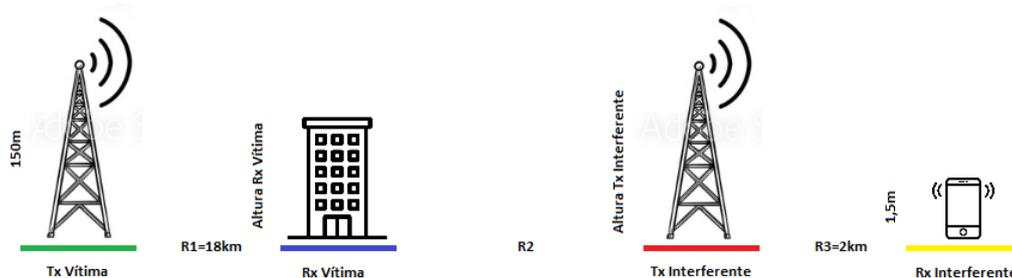
Para que haja a minimização desse tipo de interferência, devemos adotar uma distância de separação entre as células específica e pré-determinada ( $D$ ). Como podemos ver na figura 12, as células da extremidade do círculo tracejado compõem o primeiro anel de células co-canal com relação à célula do centro, portanto, dentro de um mesmo sistema, pode haver inúmeros anéis operando com as mesmas frequências, desde que se respeite a distância mínima para que a interferência entre usuários possa de fato ser controlada [30].

# Capítulo 6 - Simulações e resultados

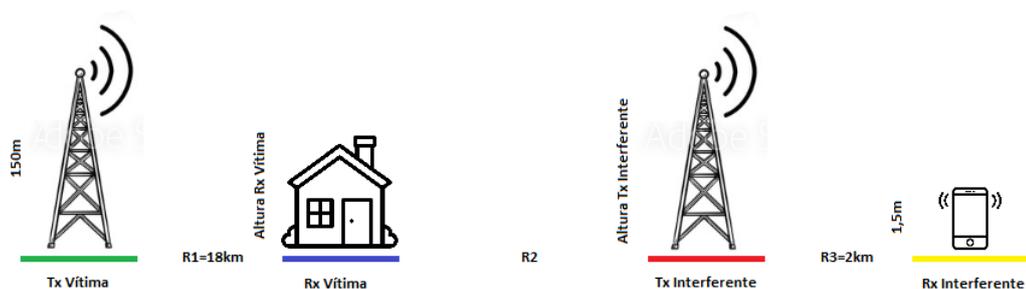
## 6.1 Introdução

Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de detectar oportunidades de espectro. Neste trabalho, as principais regulamentações para o uso de espaços em branco no mundo foram utilizadas como base para a realização de simulações e avaliação dos requisitos e limitações do uso de espaços em branco no contexto brasileiro. A escolha foi feita com base na semelhança com as características de alocação de espectro da realidade brasileira.

Por meio de simulações no software SEAMCAT foi possível identificar a distância mínima entre dois links para que não haja interferência. Para a simulação foi utilizado como critério de posicionamento da vítima, o local onde o valor da potência recebida é de -77 dBm, que é o valor da sensibilidade de recepção do sistema de televisão digital brasileiro. Na figura 13, os seguintes parâmetros foram definidos: um link de vítima e um link de interferência. Como sistema interferente, foi escolhido o sistema de comunicação Mobile LTE, operando na frequência do sistema de TV digital.



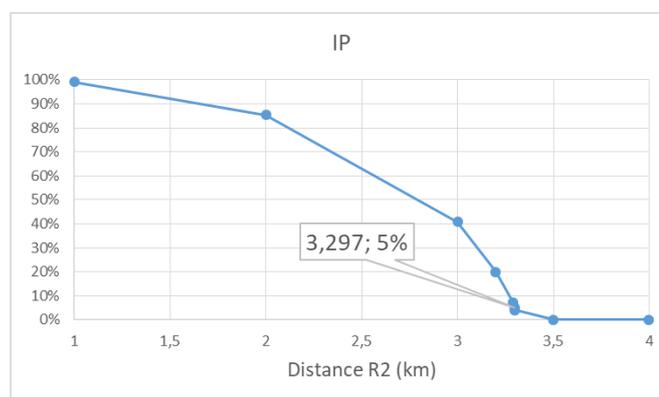
**Figura 13 - Cenário de simulação. O lado esquerdo da figura apresenta o link vítima, onde a antena receptora vítima é posicionada em cima de um prédio de altura variável e o lado direito apresenta o link interferente, onde a altura da antena transmissora interferente é variável.**



**Figura 14 - Cenário de simulação. O lado esquerdo da figura apresenta o link vítima, onde a antena receptora vítima é posicionada em cima de uma residência de altura variável e o lado direito apresenta o link interferente, onde a altura da antena transmissora interferente é variável.**

Posteriormente, na figura 14, o cenário de simulação mudou ao diminuir a altura da antena receptora vítima, onde a antena estaria em cima de uma residência, diferente da figura 13 onde a antena estaria em cima de um prédio.

Alturas das antenas transmissora vítima com 150 m, receptora vítima com 10 m, transmissora interferente de 30 m e receptora interferente 1,5 m. A distância entre as antenas transmissora e receptora vítima foi de 18 km, considerada a Zona de Operação sem Interferência, conforme tabela 1, para a classe C sobre as características das classes das emissoras de televisão digital. Para o cálculo da potência recebida, foi utilizado o modelo de predição ITU-R 1546. As características das antenas foram definidas de acordo com o sistema de comunicação.

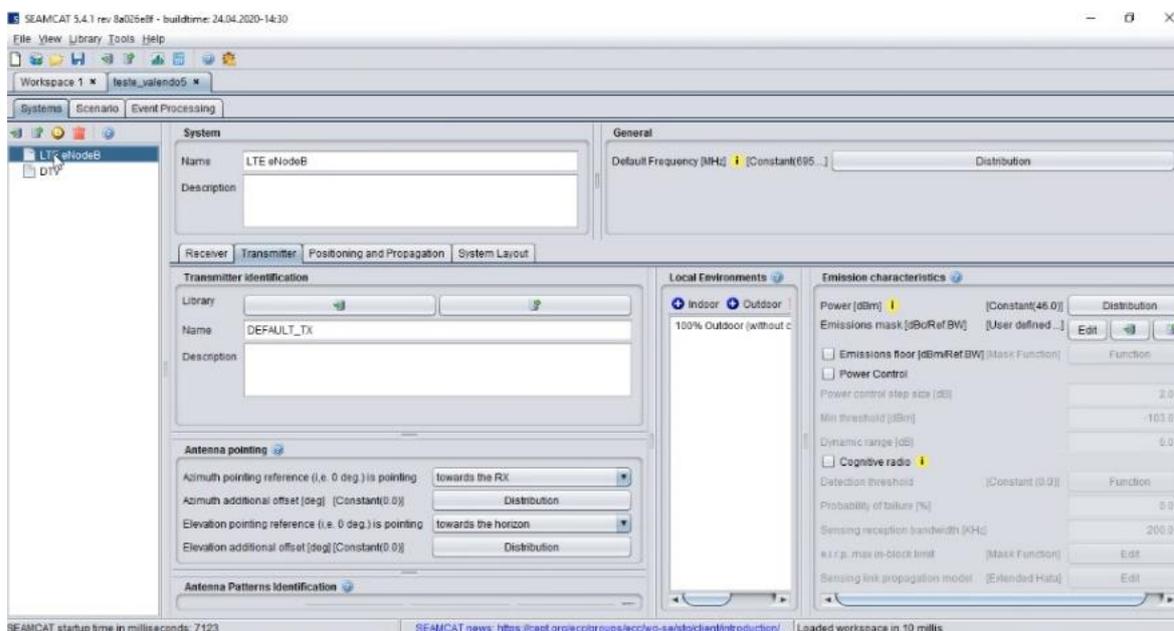


**Figura 15 - Probabilidade de interferência**

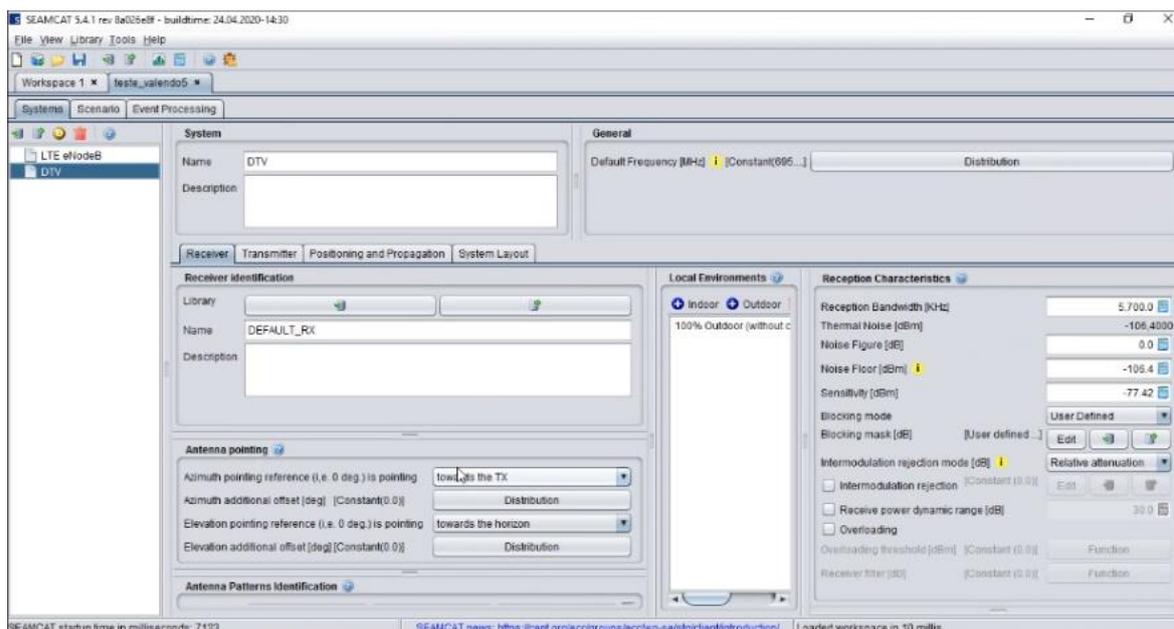
Na figura 15, os parâmetros utilizados foram 10 m de altura do receptor da vítima, 30 m de altura do transmissor interferente, EIRP de 36 dBm. A distância ( $R_2$ ) entre a antena

transmissora interferente e o receptor vítima foi variada para analisar a distância mínima para que não haja interferência entre os links. O valor de referência da probabilidade de interferência utilizado foi o limiar de 5%. Para este critério, como resultado da simulação, a distância mínima entre o receptor vítima e o transmissor interferente para um IP de 5% é de 3,3 km. Nessa análise, foi utilizado o caso mais crítico de interferência co-canal, no canal 22 (521 MHz).

Abaixo são mostradas as telas de simulação no SEAMCAT. Na figura 16 é apresentada a tela com os parâmetros usados no sistema interferente LTE e na figura 17, o sistema vítima de televisão digital.



**Figura 16 - Configuração dos parâmetros do SEAMCAT para LTE**



**Figura 17 - Configuração dos parâmetros do SEAMCAT para DTV**

Abaixo, estão descritos nas tabelas 5, 6, 7 e 8 os parâmetros utilizados no simulador SEAMCAT das antenas receptora e transmissora vítimas e das antenas receptora e transmissora interferentes, respectivamente.

**Tabela 5 - Parâmetros da antena de recepção do sistema vítima**

Rx Vítima		
Parâmetros do Sistema Receptor de DTV		
Altura da Antena	H Rx Vítima	
Frequência de Operação	Canal 14	470 - 476 MHz
	Canal 22	518 - 524 MHz
	Canal 27	548 - 554 MHz
	Canal 29	560 - 566 MHz
	Canal 51	692 - 698 MHz
Frequência Central	Canal 14	473 MHz
	Canal 22	521 MHz
	Canal 27	551 MHz
	Canal 29	563 MHz
	Canal 51	695,142857 MHz
Sensibilidade	-77,42 dBm	
Largura de Banda de Recepção	5,7 MHz	
Modelo de Propagação	ITU-R P.1546-5 land	
Classe de DTV	A	
	B	
	C	
Raio de Cobertura	R2	

**Tabela 6 - Parâmetros da antena de transmissão do sistema vítima**

<b>Tx Vítima</b>		
<b>Parâmetros do Sistema Transmissor de DTV</b>		
Altura da Antena	150 m	
Frequência de Operação	Canal 14	470 - 476 MHz
	Canal 22	518 - 524 MHz
	Canal 27	548 - 554 MHz
	Canal 29	560 - 566 MHz
	Canal 51	692 - 698 MHz
Frequência Central	Canal 14	473 MHz
	Canal 22	521 MHz
	Canal 27	551 MHz
	Canal 29	563 MHz
	Canal 51	695,142857 MHz
Potência de Transmissão	49 dBm	
Modelo de Propagação	ITU-R P.1546-5 land	
Classe de DTV	A	
	B	
	C	
Raio de Cobertura	18 km	

**Tabela 7 - Parâmetros da antena de recepção do sistema interferente**

<b>Rx Interferente</b>		
<b>Parâmetros do Sistema Receptor LTE</b>		
Altura da Antena	1,5 m	
Frequência de Operação	Canal 14	470 - 476 MHz
	Canal 22	518 - 524 MHz
	Canal 27	548 - 554 MHz
	Canal 29	560 - 566 MHz
	Canal 51	692 - 698 MHz
Frequência Central	Canal 14	473 MHz
	Canal 22	521 MHz
	Canal 27	551 MHz
	Canal 29	563 MHz
	Canal 51	695,142857 MHz
Larguras de Banda	6 MHz	
Modelo de Propagação	Hata Estendido	
Raio de Cobertura	2 km	

**Tabela 8 - Parâmetros da antena de transmissão do sistema interferente**

<b>Tx Interferente</b>		
<b>Parâmetros do Sistema Transmissor LTE</b>		
Altura da Antena	H Tx Interferente	
Frequência de Operação	Canal 14	470 - 476 MHz
	Canal 22	518 - 524 MHz
	Canal 27	548 - 554 MHz
	Canal 29	560 - 566 MHz
	Canal 51	692 - 698 MHz
Frequência Central	Canal 14	473 MHz
	Canal 22	521 MHz
	Canal 27	551 MHz
	Canal 29	563 MHz
	Canal 51	695,142857 MHz
Potência de Transmissão	EIRP = 36 dBm (EUA) ou 40 dBm (Colombia)	
Modelo de Propagação	Hata Estendido	
Raio de cobertura	2 km	
Ângulo de elevação	-6,5 °	

Com o objetivo de analisar o comportamento da curva de probabilidade de interferência e identificar a distância mínima da posição do sistema interferente, para que seja possível a recepção do sinal pelo sistema vítima, foi alterada uma série de parâmetros no simulador Seamcat: altura da antena receptora vítima, altura da antena transmissora interferente, EIRP e canal.

A seguir, são apresentados a tabela 9 indicando os parâmetros utilizados em cada uma das 25 simulações, as curvas com o resultado de cada simulação, imagens que representam o resultado das simulações no Seamcat e gráficos de barra que comparam as simulações.

## 6.2 Simulações

O parâmetro da antena receptora vítima variou em três diferentes alturas: 6 m, 10 m e 40 m. A altura mais baixa foi utilizada para exemplificar uma antena que se encontra no telhado de uma residência em uma área rural. Portanto, foi levado em consideração a altura da casa além da estrutura da antena. A altura de 10 m também é utilizada para a referência de residência rural, sendo esta a mais usual. Por último, a altura de 40 m simulou um caso mais crítico, onde a antena estaria na mesma altura da transmissora interferente.

A antena transmissora interferente variou em quatro diferentes alturas: 30 m, 40 m, 60 m e 200 m. As três primeiras são alturas bastante utilizadas, ao contrário da última, de 200 m, que foi escolhida por ser o limite máximo permitido no modelo de simulação.

A escolha para os dois valores de EIRP (36 dBm e 40 dBm) foi baseada nos modelos dos Estados Unidos e Colômbia, respectivamente, mostrados anteriormente na tabela 3.

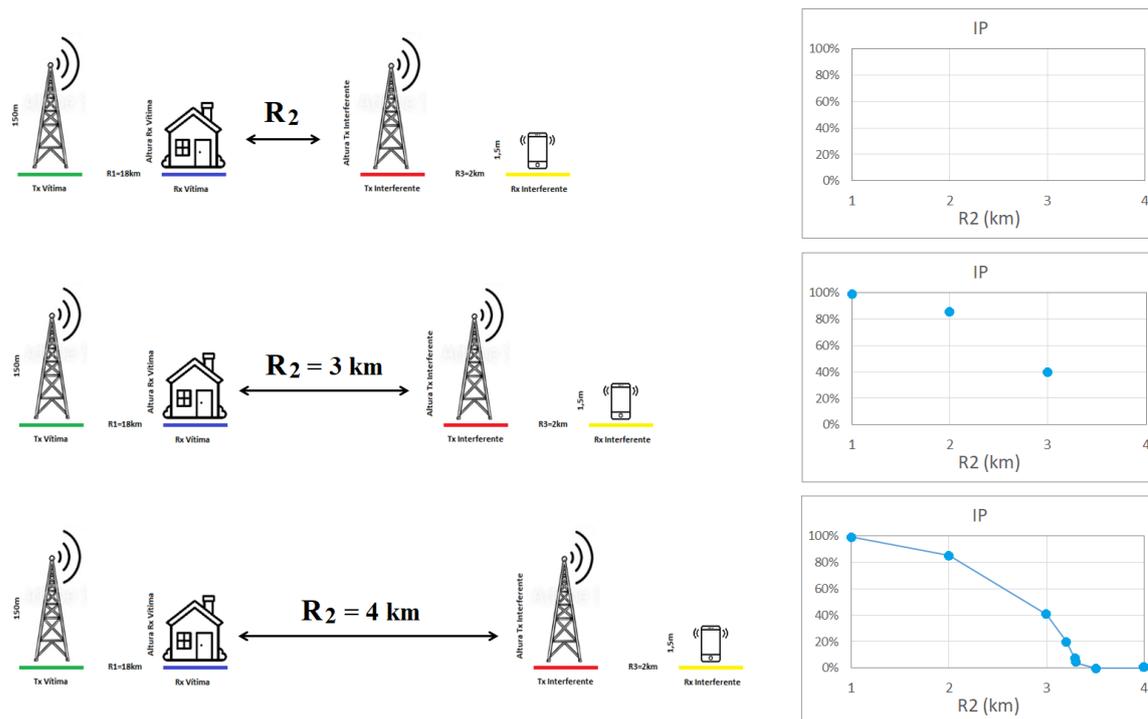
Por fim, foram analisados diferentes canais de frequência ao longo do espectro: canais 14, 22, 27, 29 e 51. Porém, na grande maioria das simulações foi mantido o canal 22 de forma arbitrária.

**Tabela 9 - Resumo dos resultados de simulações**

Simulação	Altura Rx Vítima	Altura Tx Interferente	EIRP	Canal
1	6 m	30 m	36 dBm	Canal 22
2		60 m		Canal 22
3		30 m		Canal 22
4	10 m	40 m		Canal 22
5		30 m		Canal 22
6	40 m	40 m		Canal 14
7				Canal 22
8				Canal 27
9				Canal 29
10				Canal 51
11				60 m
12	200 m	Canal 22		
13	6 m	30 m	40 dBm	Canal 22
14		60 m		Canal 22
15	10 m	30 m		Canal 22
16		40 m		Canal 22
17	40 m	30 m		Canal 22
18		40 m		Canal 14
19				Canal 22
20				Canal 27
21				Canal 29
22				Canal 51
23	60 m			Canal 22
24	200 m	Canal 22		

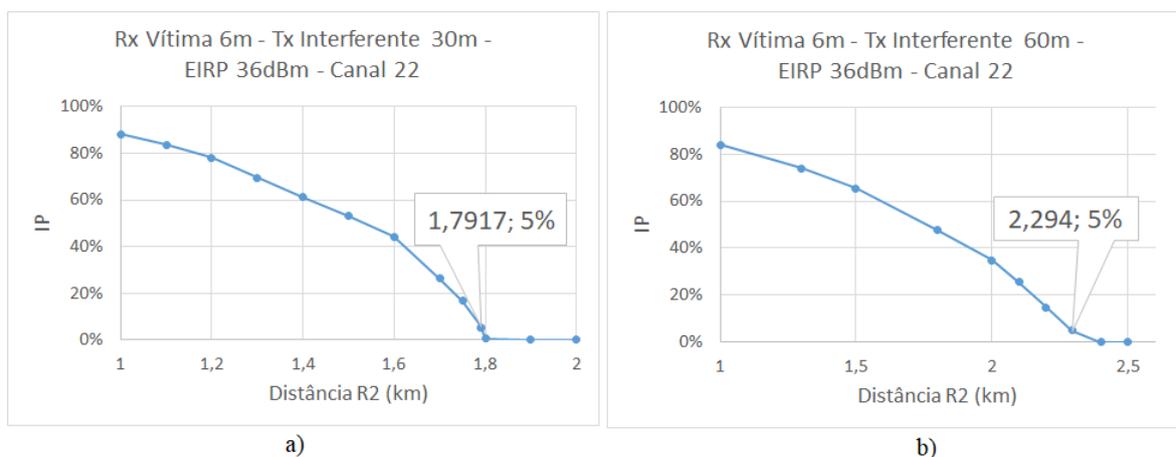
Os gráficos a seguir apresentam as curvas de probabilidade de interferência, resultantes dos diferentes cenários de acordo com as alterações de parâmetros apresentados na tabela 9.

Para entender como foram gerados os gráficos, a figura 18 abaixo ilustra a antena transmissora interferente sendo afastada da antena receptora vítima, onde esta distância é indicada como  $R_2$ , e em cada uma dessas posições, o simulador Seacat indica a probabilidade de interferência (IP) naquela posição.



**Figura 18 – Esquema ilustrativo para gerar gráficos de IP**

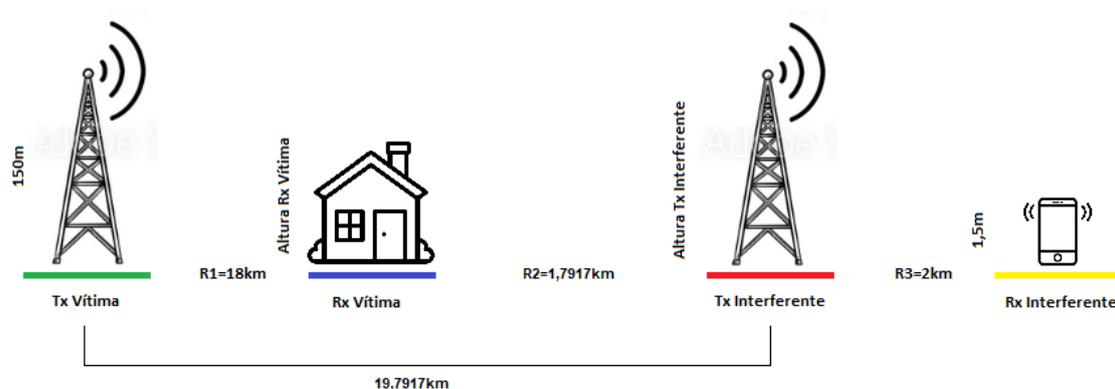
O primeiro gráfico, apresentado na figura 19.a, ilustra o primeiro cenário de simulação, onde a altura da antena receptora vítima possuía 6 m, a altura da antena transmissora interferente 30 m, EIRP de 36 dBm como o padrão dos Estados Unidos, e as duas antenas em 521 MHz, frequência central do canal 22, representando a interferência co-canal.



**Figura 19 - a) 1º cenário: altura da antena receptora vítima de 6 m, altura da antena transmissora interferente de 30 m, EIRP dos EUA 36 dBm e frequência central 521 MHz do canal 22; b) 2º cenário: aumento da altura da antena transmissora interferente do 1º cenário para 60 m;**

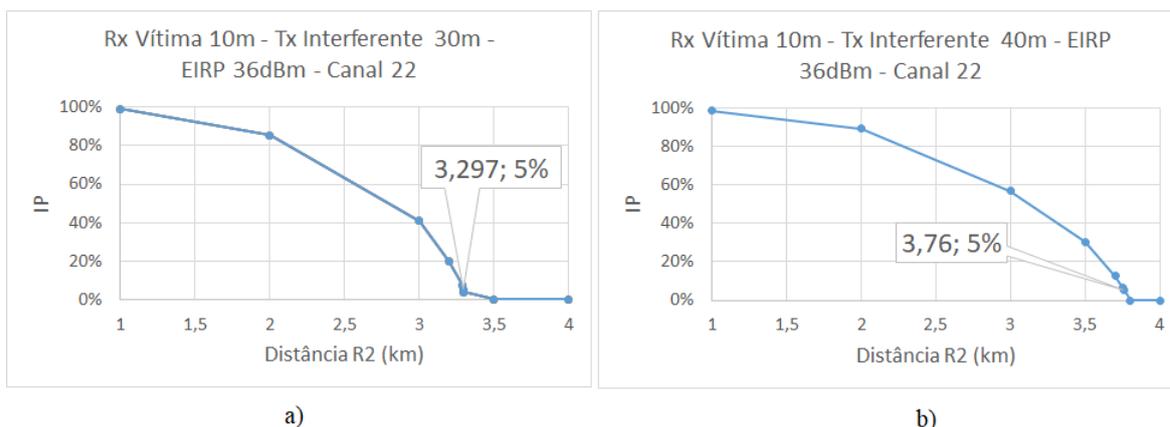
Como resultado, podemos analisar na figura 19.a que foi indicada a distância 1,7917 km em 5%. Isso significa que, como foi estipulado anteriormente que 5% era o limite aceitável de probabilidade de interferência, deve haver uma distância mínima de 1,8 km entre a antena receptora vítima e a antena transmissora interferente para que o sinal desejado seja recebido.

Como exemplo, no caso mostrado na figura 14, a antena receptora vítima estaria à 18 km da antena transmissora vítima, e a antena transmissora interferente deveria estar, no mínimo, à aproximadamente 19,8 km de distância da antena transmissora vítima, como ilustrado na figura 20 abaixo.



**Figura 20 – Ilustração do 1º cenário de simulação.**

Em seguida, foi realizado outro cenário de simulação, onde, na figura 19.b, a antena transmissora interferente aumentou, de 30 m para 60 m. Com isso, foi possível observar que a distância  $R_2$  aumentou de 1,7917 km para 2,294 km.

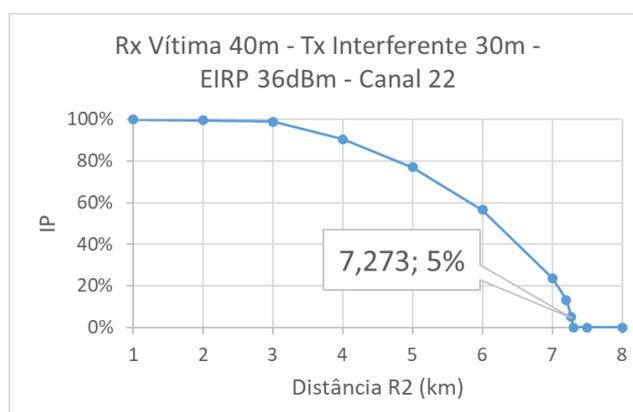


**Figura 21 - a) 3º cenário: aumento da altura da antena receptora vítima do 1º cenário para 10 m; b) 4º cenário: aumento da altura da antena transmissora interferente do 3º cenário para 40 m**

A figura 21.a mostra como a probabilidade de interferência se comporta ao aumentar a altura da antena receptora vítima do primeiro cenário, de 6 m para 10 m, aumentando a distância  $R_2$  de 1,7917 km para 3,297 km.

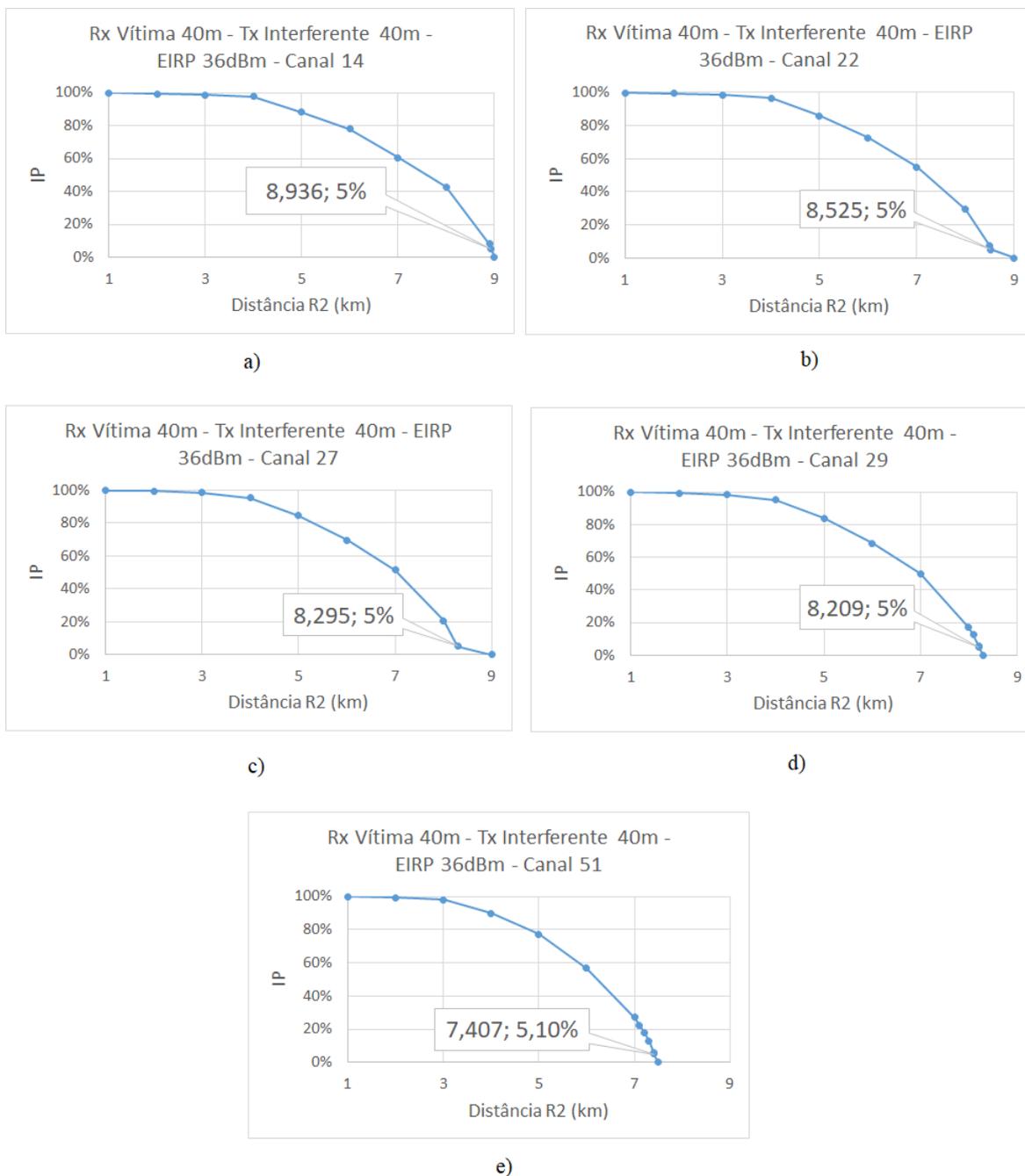
Já na figura 21.b foi usado como base o terceiro cenário, com a antena receptora vítima sendo mantida com 10 m e a antena transmissora interferente aumentando de 30 m para 40 m, fazendo a distância  $R_2$  aumentar 0,463 km.

Conforme a altura da antena receptora vítima aumentou de 6 m para 40 m, entre o primeiro e o quinto cenários, o resultado da figura 22 mostra que a distância mínima aumentou de 1,7917 km para 7,273 km.



**Figura 22 - 5º cenário: aumento da altura da antena receptora vítima do 1º cenário para 40 m**

Sendo assim, a distância  $R_2$  aumentou 1,5053 km quando a antena receptora vítima aumentou de 6 m para 10 m e 3,976 km quando aumentou de 10 m para 40 m.

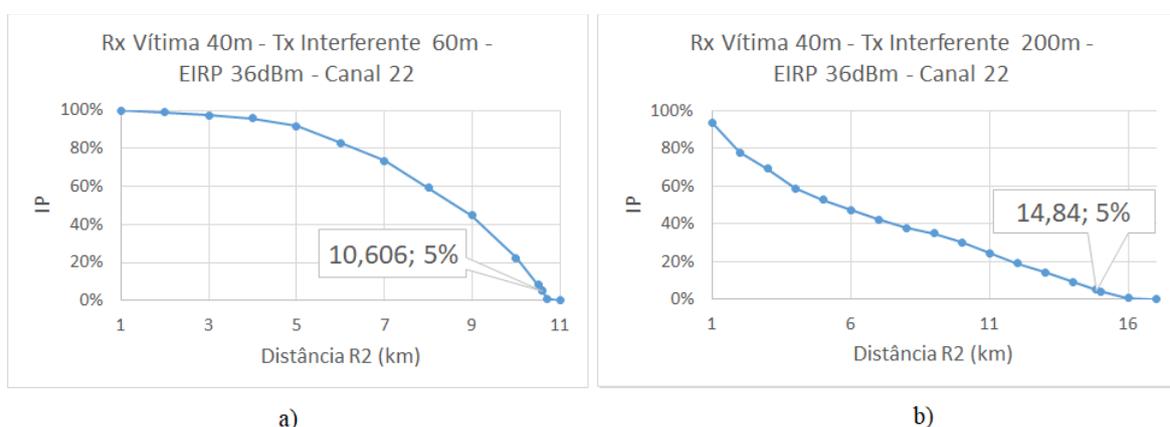


**Figura 23-** a) 6º cenário: altura da antena receptora vítima de 40 m, altura da antena transmissora interferente de 40 m, EIRP dos EUA 36 dBm e frequência central 473 MHz do canal 14; b) 7º cenário: mudança da frequência central do 6º cenário para 521 MHz do canal 22; c) 8º cenário: mudança da frequência central do 6º cenário para 551 MHz do canal 27; d) 9º cenário: mudança da frequência central do 6º

**cenário para 563 MHz do canal 29; e) 10º cenário: mudança da frequência central do 6º cenário para 695 MHz do canal 51**

A figura 23 apresenta cinco diferentes cenários, alterando o canal em que as antenas se encontram, mas mantendo a altura da antena receptora vítima com 40 m, assim como da antena transmissora interferente também com 40 m, e a EIRP dos EUA de 36 dBm.

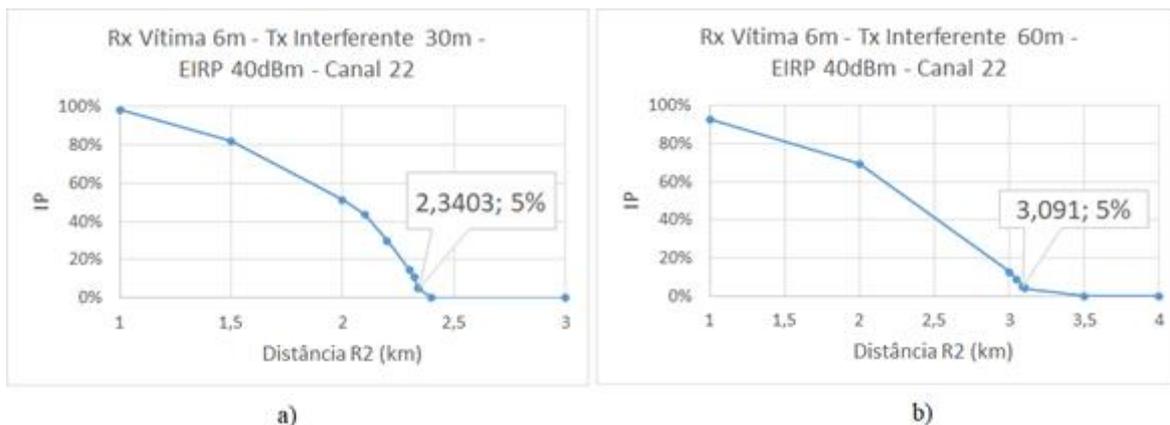
A distância  $R_2$ , então, no canal 14 foi de 8,936 km na figura 23.a e conforme o canal foi alterando e aumentando,  $R_2$  foi diminuindo para 7,407 km na figura 23.e.



**Figura 24- a) 11º cenário: altura da antena receptora vítima de 40 m, altura da antena transmissora interferente de 60 m, EIRP dos EUA 36 dBm e frequência central 521 MHz do canal 22; b) 12º cenário: aumento da altura da antena transmissora interferente do 5º cenário para 200 m**

Na figura 22, a distância  $R_2$  foi 7,273 km com a altura da antena receptora vítima de 40 m e a transmissora interferente 30 m, ao dobrar a altura da antena transmissora interferente para 60 m na figura 24.a, a distância aumentou para 10,606 km e aumentando até o limite máximo permitido no modelo de simulação, para 200 m na figura 24.b,  $R_2$  chegou a 14,84 km.

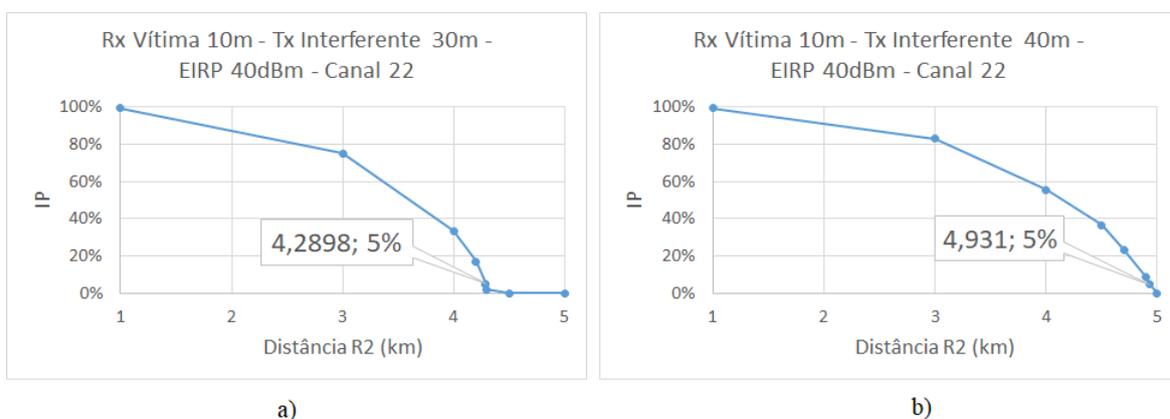
Em seguida, foi alterado o parâmetro da EIRP dos EUA de 36 dBm para da Colômbia de 40 dBm, como mostrado na figura 25.a.



**Figura 25- a) 13º cenário: alteração da EIRP do 1º cenário para a da Colômbia de 40 dBm; b) 14º cenário: aumento da altura da antena transmissora interferente do 13º cenário para 60 m**

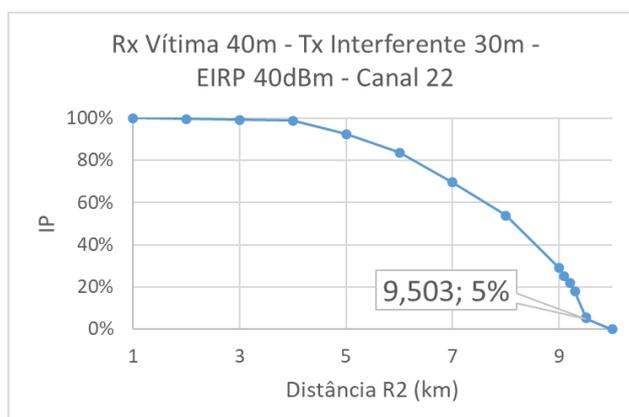
Neste décimo terceiro cenário da figura 25.a, a distância  $R_2$  foi de 2,3403 km, maior do que no primeiro cenário, com 1,7917 km. Na figura 25.b altura da antena transmissora interferente dobrou, para 60 m, e a distância de 3,091 km também aumentou em relação ao segundo cenário, onde  $R_2$  foi 2,294 km.

Na sequência, o terceiro cenário, com a antena receptora vítima de 10 m, antena transmissora interferente de 30 m no canal 22 com EIRP dos EUA 36 dBm, foi alterado para EIRP da Colômbia de 40 dBm com os mesmos parâmetros de altura das antena e mesmo canal, resultando na figura 26.a.



**Figura 26- a) 15º cenário: alteração da EIRP do 3º cenário para a da Colômbia de 40 dBm; b) 16º cenário: aumento da altura da antena transmissora interferente do 15º cenário para 40 m**

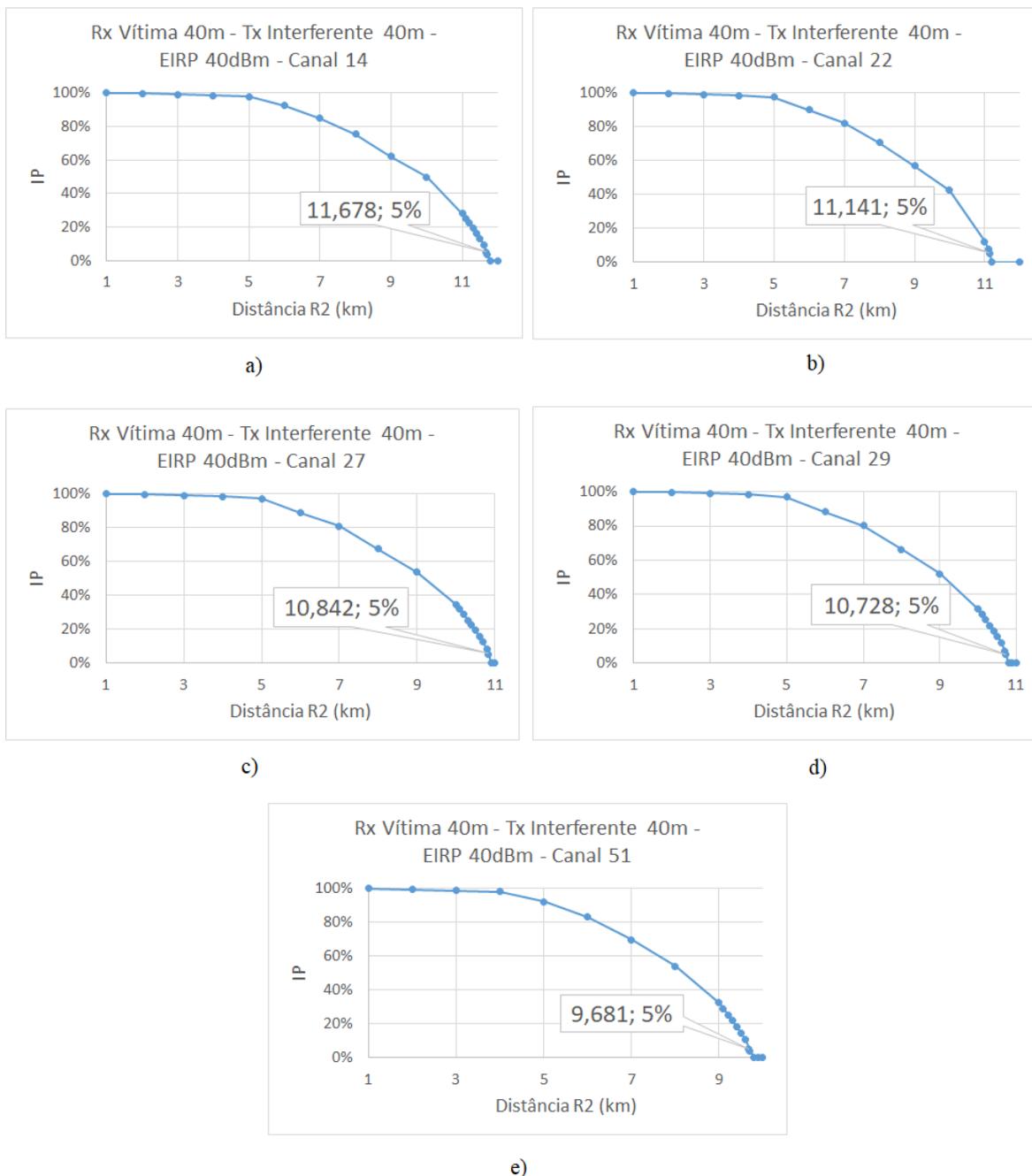
A figura 26.a mostra o décimo quinto cenário, onde a  $R_2$  aumentou quase 1 km em relação ao terceiro cenário. A figura 26.b já mostra um aumento da altura da antena transmissora interferente do décimo quinto cenário para 40 m, resultando na distância  $R_2$  com 4,931 km.



**Figura 27- 17º cenário: aumento da altura da antena receptora vítima do 15º cenário para 40 m**

No cenário seguinte, na figura 27, a altura da antena receptora vítima aumentou de 10 m para 40 m em relação ao décimo quinto cenário, assim como foi feito do terceiro para o quinto cenário. Neste caso, o décimo sétimo cenário mostra que a distância deve ser de 9,503 km, maior do que no quinto cenário, que foi 7,273 km.

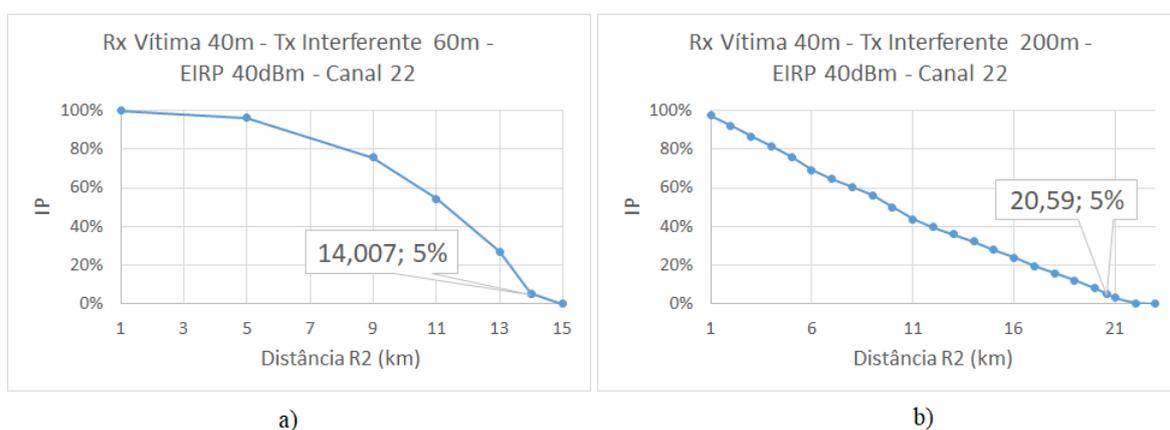
Novamente foi feita a simulação dos cenários em diferentes canais, como mostrado na figura 28.



**Figura 28- a) 18° cenário: altura da antena receptora vítima de 40 m, altura da antena transmissora interferente de 40 m, EIRP da Colômbia 40 dBm e frequência central 473 MHz do canal 14; b) 19° cenário: mudança da frequência central do 18° cenário para 521 MHz do canal 22; c) 20° cenário: mudança da frequência central do 18° cenário para 551 MHz do canal 27; d) 21° cenário: mudança da frequência central do 18° cenário para 563 MHz do canal 29; e) 22° cenário: mudança da frequência central do 18° cenário para 695 MHz do canal 51**

No décimo oitavo cenário, na figura 28.a, a distância  $R_2$  foi de 11,678 km e aumentou 2,742 km em relação ao sexto cenário, em que  $R_2$  foi 8,936 km. Nos cenários seguintes, foi possível perceber uma diminuição no valor de  $R_2$  conforme os canais foram alterados e as frequências centrais eram mais altas. Portanto, nestes cinco cenários observamos que a figura 28.a apresentou a maior distância no canal 14, os cenários seguintes apresentaram uma diminuição no valor de  $R_2$ , e a figura 28.e obteve a menor distância  $R_2$  com 9,681 km no canal 51.

Por fim, foram simulados os últimos dois cenários, figura 29.a e 29.b, onde mantiveram-se os parâmetros dos cenários 11 e 12, respectivamente, porém com a EIRP da Colômbia de 40 dBm.



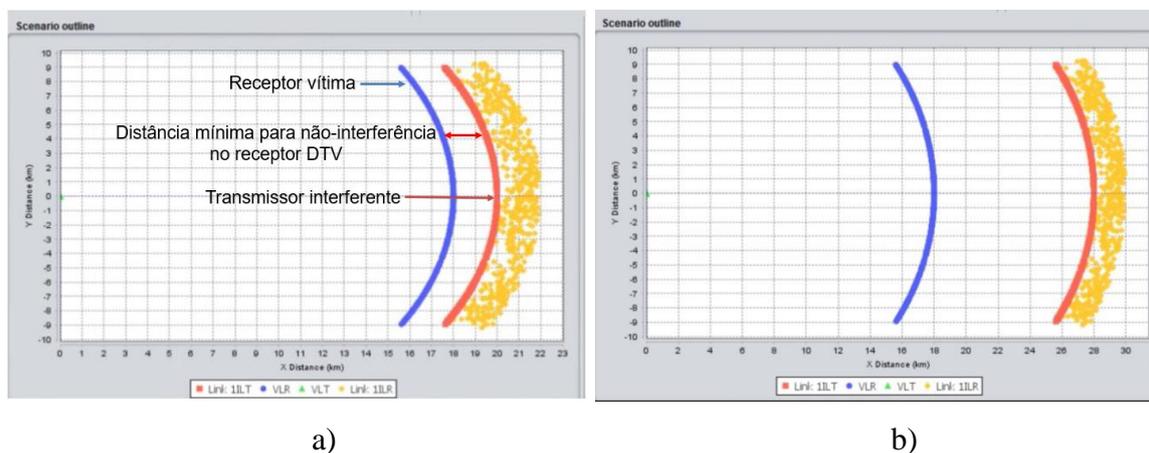
**Figura 29- a) 23º cenário: altura da antena receptora vítima de 40 m, altura da antena transmissora interferente de 60 m, EIRP da Colômbia 40 dBm e frequência central 521 MHz do canal 22; b) 24º cenário: aumento da antena transmissora interferente do 23º cenário para 200 m**

Em relação ao décimo primeiro cenário, o vigésimo terceiro, apresentou um aumento de 3,401 km e comparando o décimo segundo cenário com o vigésimo quarto, um aumento de 5,75 km.

Abaixo, a figura 30 está ilustrando o resultado de duas simulações no Seamcat. É possível observar que os círculos azuis são uma representação das 200 possíveis posições do VLR (sistema receptor vítima), os quadrados vermelhos do ILT (sistema transmissor interferente), losangos amarelos do ILR (sistema receptor interferente) e o triângulo verde,

na posição 0 do eixo Y e 0 do eixo X, representa a posição do VLT (sistema transmissor vítima).

Sendo assim, os sistemas VLR e ILT se afastam à medida que aumenta a distância entre eles no eixo X.



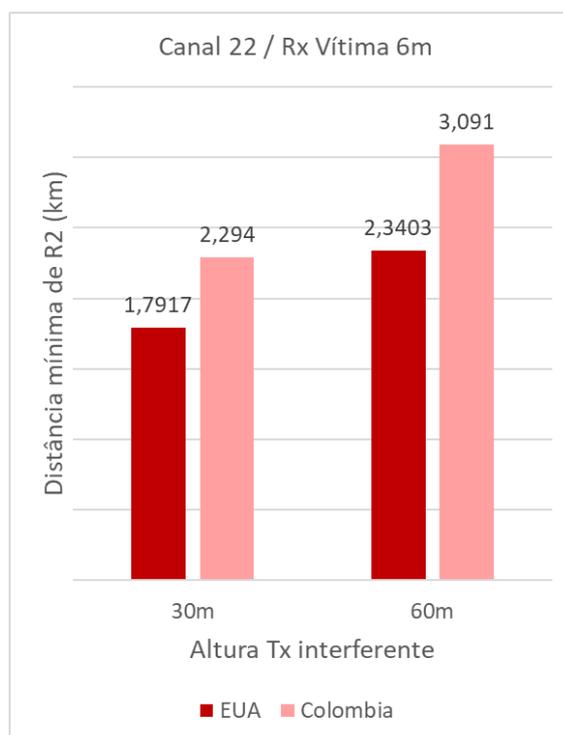
**Figura 30- a) Outline com posicionamento dos sistemas vítima (VLT e VLR) e interferente (ILT e ILR)**

## 6.3 Resultados

A partir das curvas acima, foram gerados gráficos que irão auxiliar na análise e conclusão das simulações. Em cada um dos cenários, foi identificada a distância mínima ( $R_2$ ) entre as antenas receptora vítima e transmissora interferente para que a interferência não impedisse a recepção do sinal desejado na antena receptora vítima. O critério utilizado indica que 5% de probabilidade de interferência (IP) é o limite aceitável na recepção do sinal. Portanto, nos gráficos abaixo, foram comparadas as distâncias indicadas neste limite de 5% de IP.

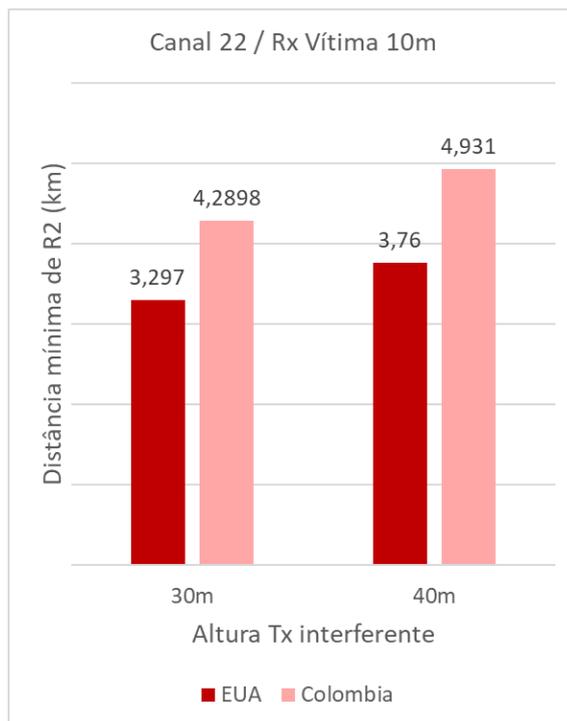
A figura 31 apresenta um gráfico com o compilado dos seguintes cenários de simulação: 1°, 2°, 13° e 14°. O gráfico compara as diferentes alturas da antena transmissora interferente, com a altura da antena receptora vítima fixa 6 m, com diferentes parâmetros de EIRP, em uma situação de interferência co-canal em que as antenas receptora vítima e transmissora interferente encontram-se no mesmo canal 22, com frequência central em 521 MHz do canal 22.

No padrão utilizado pela Colômbia, com a EIRP de 40 dBm, os valores das distâncias mínimas ( $R_2$ ) são maiores do que as distâncias do padrão dos EUA, com EIRP de 36 dBm. Para mantermos a garantia de ter no máximo 5% de IP, a indicação nestes cenários seria de posicionar as antenas com uma distância mínima de 3,091 m entre elas.



**Figura 31- Variação da altura da antena transmissora interferente em relação a diferentes EIRPs, para antena receptora vítima de 6 m**

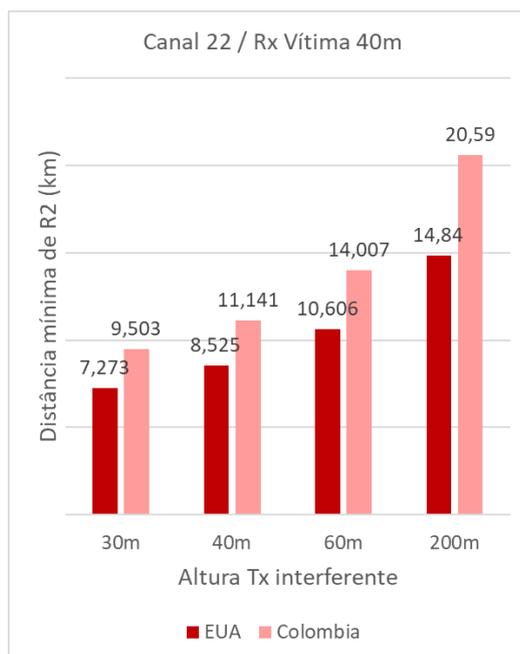
Em seguida, na figura 32, foi criado um gráfico com o compilado dos seguintes cenários de simulação: 3°, 4°, 15° e 16°. O gráfico compara as diferentes alturas da antena transmissora interferente, com a altura da antena receptora vítima fixa 10 m, com diferentes parâmetros de EIRP, em uma situação de interferência co-canal em que as antenas receptora vítima e transmissora interferente encontram-se no mesmo canal 22, com frequência central em 521 MHz do canal 22.



**Figura 32- Variação da altura da antena transmissora interferente em relação a diferentes EIRPs, para antena receptora vítima de 10 m**

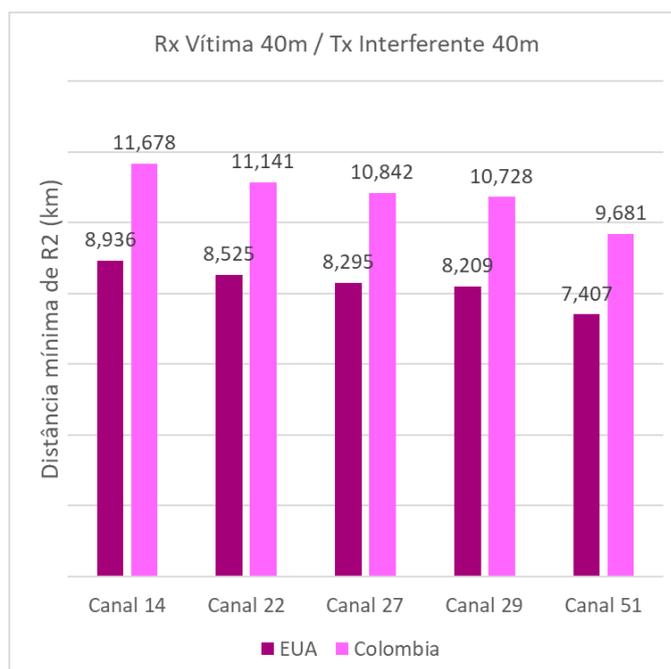
É possível, inclusive, perceber que a distância mínima  $R_2$  quase dobra, ao aumentar a altura da antena receptora vítima de 6 m para 10 m, comparando as primeiras duas barras das figuras 31 e 32.

Já na figura 33, foi fixada a altura da antena receptora vítima em 40 m, e variados dois outros parâmetros: a altura da antena transmissora interferente e a EIRP. Dessa forma, é notável que a distância mínima  $R_2$  aumenta quanto maior for a altura de uma das antenas, e que há uma diferença entre a EIRP utilizada.



**Figura 33- Variação da altura da antena transmissora interferente em relação a diferentes EIRPs, para antena receptora vítima de 40 m**

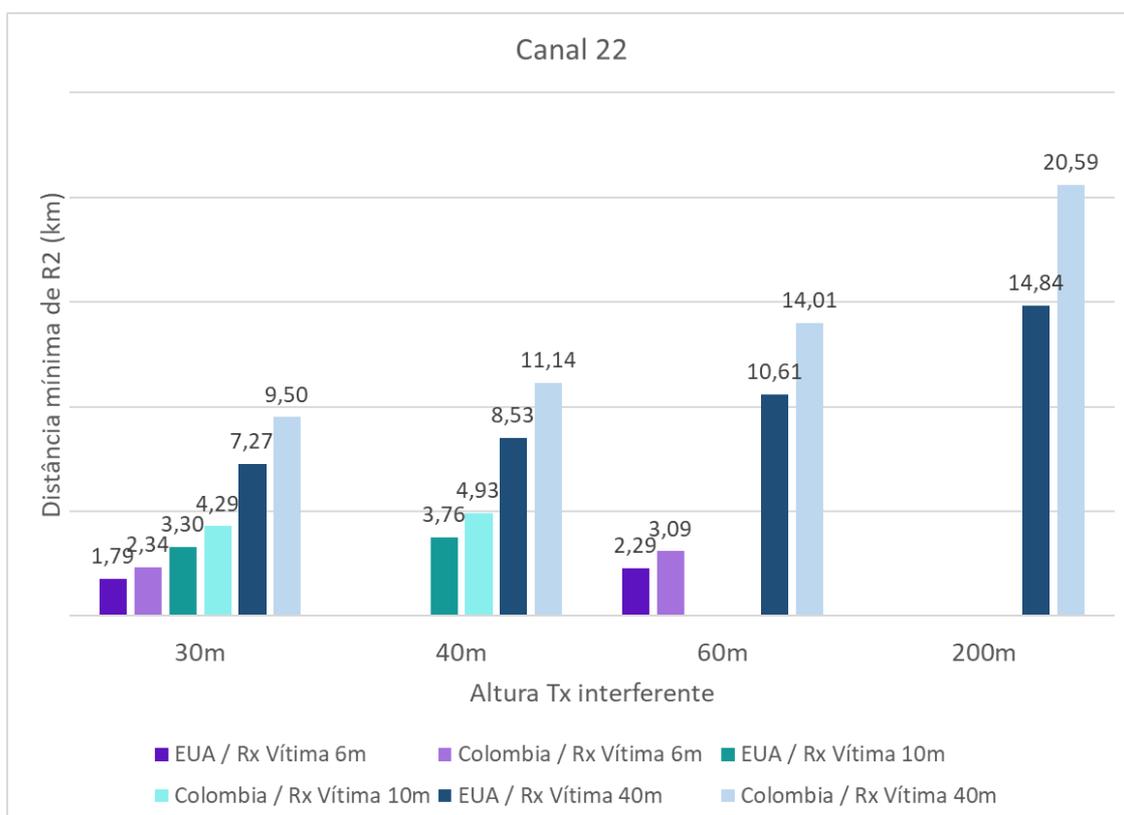
Com o objetivo de verificar se a escolha do canal possui um impacto relevante na distância mínima ( $R_2$ ) entre as antenas, foi gerado o gráfico abaixo, da figura 34. Através dos resultados, é importante notar que a escolha do canal é um importante parâmetro a ser analisado.



**Figura 34- Variação do canal em relação a diferentes EIRPs, para antenas receptora vítima e transmissora interferente de 40 m**

Por fim, é apresentado na figura 35 um compilado com algumas das principais simulações, que nos permite realizar a comparação entre os diferentes parâmetros de EIRP utilizados por Estados Unidos e Colômbia, a relação entre as alturas das antenas receptora vítima e transmissora interferente e o impacto nas distâncias mínimas.

Como esperado, vemos que quanto maior a altura das antenas, maior a distância  $R_2$ . As distâncias de  $R_2$  são maiores ao utilizarmos o parâmetro de 40 dBm para EIRP usado na Colômbia, em relação ao parâmetro de 36 dBm utilizado pelos EUA.



**Figura 35- Variação das alturas das antenas receptora vítima e transmissora interferente em relação a diferentes EIRPs, no canal 22**

## Capítulo 7 - Conclusão

Neste trabalho foram apresentadas características do sistema de TV Digital brasileiro. Da mesma forma um breve resumo sobre o conceito de espaços em branco (TV White Space – TVWS) foi descrito. A seguir foram apresentadas de forma sucinta, as principais regulamentações do uso de espaços em branco no mundo. Dados de uma campanha de medições na faixa UHF do serviço de TV Digital na cidade de Niterói, no estado do Rio de Janeiro foi comparado com os canais cadastrados na Anatel a operar naquela região. Com a análise é possível observar que existe uma discrepância entre o cadastrado e o verificado através das medições. No total é possível observar que há 16 canais livres, totalizando 96 MHz de banda sem uso e apresentam, portanto, oportunidade de uso mais eficiente. Desta forma é verificada a necessidade da realização de medições para identificar os espaços em branco. Algumas implementações utilizam um banco de dados fornecido pelas agências reguladoras, porém em alguns casos como os observados neste documento não correspondem ao observado em campo. Das medições externas é possível observar que em alguns pontos o sinal recebido está abaixo do nível de sensibilidade de recepção dos receptores, gerando novas oportunidades e de maneira intuitiva podemos inferir que dentro das edificações o sinal continuará ausente gerando a possibilidade de criar redes internas para fornecer serviço de acesso em banda larga. São respeitados os limites de transmissão e geração de interferência fora da banda.

Os principais regulamentos para o uso de espaços em branco no mundo são apresentados resumidamente a seguir. A partir dessa regulamentação, foi possível simular situações que se enquadram na realidade brasileira e analisar as restrições para implantação do uso de TVWS no Brasil.

É observado que não existe uma discrepância muito grande entre as soluções definidas pelos países ou comitês, desta forma dadas as características tanto do sistema primário (DTV) como da alocação de frequências do serviço primário, soluções do tipo da FCC ou Colômbia poderiam ser implementadas em áreas rurais ou fora do contorno protegido da área de cobertura do serviço de TV Digital. É sempre necessário respeitar os limites de transmissão e geração de interferências fora de banda. Porém sempre será necessário a realização de testes em bancada e campo para validar a coexistência dos sistemas.

## Bibliografia

- [1] NASCIMENTO, M. F. S.; EVANGELISTA, R. B.; SILVA, C. F. M.; CAVALCANTI, F. R. P. “TV White Spaces for Digital Inclusion in Brazil”.
- [2] VIDAL, D. C.; CASTELLANOS, P. V. G.; FERREIRA, T. N. “Avaliação Preliminar das Oportunidades de Espectro na Região Metropolitana de Niterói na Faixa UHF da TV Digital”, XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT2019, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1-5, September 2019.
- [3] PIETROSEMOLI, E.; ZENNARO, M. TV White Spaces: A Pragmatic Approach. [S. l.]: ICTP, 2013. 181 p.
- [4] CAVALCANTI, J. F. “Medidas de Rádio Propagação em UHF em Ambientes Suburbanos para TV Digital: Estudo de Cobertura para Recepção Fixa”, pp. 1-135, 2005.
- [5] ANATEL (ed.). Televisão Digital. In: ANATEL. Televisão Digital. [S. l.], 25 mar. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiodifusao/televisao-digital>. Acesso em: jul. 2021.
- [6] INMETRO, Testes de Televisão Digital na Faixa de VHF Alto, canais 12 e 13, realizados com sistema de transmissão experimental no Gama-DF, 2012
- [7] OH, S. W.; MA, Y.; TAO, M.; PEH, E. C. Y. “An overview and comparison of tv white space regulations worldwide”.
- [8] CACHONI, M. D. A.; GUDWIN, R. Rádios Cognitivos e Clusterização. [S. l.], p. 1-6.
- [9] III, Joseph. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Royal Institute of Technology (KTH), p. 1-304, 8 maio 2000.
- [10] NGUYEN, V. T.; VILLAIN, F.; LE GUILLOU, Y. Cognitive Radio RF: Overview and Challenges. [S. l.], p. 1-13, fev. 2012.
- [11] VIDAL, D. C.; GONZALEZ, P. V. C.; FERREIRA, T. N.; GONSIOROSKI, L.; ARNEZ, J. A. Comparação Preliminar dos Níveis de Ocupação de Espectro Temporal e Espacial numa Região Metropolitana. XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT2018, [S. l.], p. 1-4, 19 set. 2018.
- [12] DAVOUDIAN, A. IEEE 802.22: A Revolution for Wireless Regional Area Networks. IEEE, [S. l.], p. 1-4.
- [13] HTIKE, Z.; HONG, C. Overview of 802.22 WRAN Standard and Research Challenges. 2012.

- [14] LOPEZ-BENITEZ, M.; UMBERT, A.; CASADEVALL, F. Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications. IEEE, [S. l.], 12 jun. 2009.
- [15] PETRIN, A.; STEFFES, P. G. Measurement and Analysis of Urban Spectrum Usage. [S. l.], p. 1-4.
- [16] MEDINA, E. Sensoriamento Espectral Baseado na Detecção de Energia Para Rádios Cognitivos. [S. l.], p. 1-95, 2014.
- [17] TAHER, T. M.; BACCHUS, R.; ZDUNEK, K. Long-term spectral occupancy findings in Chicago. IEEE, [S. l.], 20 jun. 2011.
- [18] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. **FCC 04-113**. [S. l.], 25 maio 2004.
- [19] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. **FCC 14-144**. [S. l.], 30 set. 2014.
- [20] ROJAS, D. F. A.; GARCÍA, L. E. G.; ORTIZ, G. M. R.; CARRERO, W. A. C. “Estudio de la tecnología de TVWS en Colombia y comparación con el mundo”, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, v. 2, ed. 34, pp. 127-136, 30 Junho 2019.
- [21] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. **FCC 10-174**. [S. l.], 23 set. 2010.
- [22] LAVAUX, D.; AIACHE, H.; ROUSSEAU, S. A TV White-Spaces Wireless Network Architecture for Efficient Spectrum Sharing in Europe, and its Applicability for Public Safety Applications. Proceedings of SDR'11-WinnComm-Europe, [S. l.], p. 1-7, 24 jun. 2011.
- [23] OLIVER, M.; SALAS, F. Where are the TV White Space pilots? Are they still a solution for the mobile broadband market?. **CPRLATAM Conference, Cartagena, Colombia**, [S. l.], p. 1-8, 23 jun. 2017.
- [24] PINEDA, D.; HERNANDEZ, C. Cognitive radio for TVWS usage. **TELKOMNIKA**, [S. l.], p. 1-12, 18 jul. 2019.
- [25] RELATÓRIO Técnico sobre Redes Sem Fio. **Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”**, [S. l.], p. 1-17, 1 mar. 2008.
- [26] ANATEL publica resolução para uso de espectro ocioso. [S. l.], 6 out. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-publica-resolucao-para-uso-de-espectro-ocioso>. Acesso em: 20 out. 2021.
- [27] CEPT/ECO, “Handbook SEAMCAT,” January 2010.

- [28] ECC Report 252 SEAMCAT Handbook Edition 2, 29 Abril 2016.
- [29] OKAMOTO, D. M. Análise da coexistência entre TV digital e LTE na faixa de 700 MHz – medidas e simulações, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Março 2016.