EULER EDSON APAZA MEDINA

Femtocélulas Cognitivas em TV White Spaces Para Redes Celulares 5G

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Ciências.

São Paulo 2021

EULER EDSON APAZA MEDINA

Femtocélulas Cognitivas em TV White Spaces Para Redes Celulares 5G

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Sergio Takeo Kofuji

São Paulo 2021 Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de abril de 2021

Car monell

Assinatura do autor

Serve Take lofus Assinatura do orientador

Catalogação-na-publicação

Medina, Euler Edson Apaza

Femtocélulas Cognitivas em TV White Spaces Para Redes Celulares 5G / E. E. A. Medina -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

123 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Femtocélulas 2.5G 3.TV White Space 4.Rádio Cognitivo 5.TV Digital I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedicada a meu irmão e grande amigo Engler. Esta tese também é sua.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos aqueles que me apoiaram durante o processo do meu Doutorado, sem eles não teria sido possível a culminação deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo - FUSP pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Sergio Takeo Kofuji, pela oportunidade de tê-lo como orientador, pelo grande apoio, compreensão e paciência para a conclusão deste trabalho. A você minha eterna gratidão.

Aos professores Dr. Luiz Carlos Kretly e Dr. Juan Luis Poletti Soto, pelas valiosas sugestões durante o meu exame de qualificação.

Ao professor Dr. Moacyr Martucci Junior e os projetos da Comissão Europeia H2020: 5GRANGE e 5GINFIRE.

Ao Dr. Jarbas Lopes Cardoso Júnior pela amizade e pelas dicas ao longo da minha pós-graduação.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Comunicações e Sinais - LCS e do Laboratório de Computação Pervasiva e de Alto Desempenho - PAD, pelas discussões e compartilhamento de experiências.

À minha família, fonte de força e coragem na minha vida: Evasio, María, Anghi, Engler, Astrit, Thaís, Míriam del Pilar e Anthonela. Que sempre acreditam em mim e me apoiam. Não houve nem um dia em que não pensei em vocês.

Obrigado,

Euler Edson Apaza Medina

Em memória do Prof. Silvio Barbin

No final de 2011, quando me candidatei para a pós-graduação, tive a grande dita de conhecer ao professor Dr. Silvio Ernesto Barbin, a pessoa que abriu com entusiasmo as portas da USP e do Brasil para mim.

Lembro quando o conheci, ele me recebeu com um sorriso na sala D3-18. Mesmo com as minhas limitações, acreditou em mim e aceitou ser meu orientador.

Fui conhecendo a grandeza dele durante o mestrado. Conhecido no mundo todo, era um homem que amava a sua família, que amava o que fazia, sempre com uma enorme paixão por seu trabalho. Um homem de bom coração, que até em momentos difíceis para ele, conseguia ajudar aos demais.

Foram muitos anos de trabalho junto com meu orientador, meu professor, meu amigo. Confiante e conversador, ele sempre teve um sorriso e palavras adequadas para cada momento.

Foi naquela sala, a D3-18, onde ele despediu-se de mim e o vi sair por última vez um 4 de outubro de 2018, com o mesmo sorriso de quando o conheci. Ele faleceu um dia depois.

Hoje eu quero agradecer ele por ter me aceito como seu aluno, por confiar em mim, por ter me ensinado muito, por ter se preocupado, tanto no profissional quanto no pessoal. Sempre terei muito orgulho de dizer que ele foi um dos responsáveis pela minha formação profissional.

Professor Silvio, muito obrigado! 2,7182

RESUMO

Femtocélulas foram propostas para aumentar a capacidade da rede celular, geralmente em ambientes interiores. Elas não são parte do planejamento celular mas utilizam a mesma frequência de operação que a rede macrocelular. Dessa forma, elas podem causar interferência no sistema e a redução dessa interferência é um dos maiores desafios existentes atualmente. Por outro lado, TV White Space (TVWS) refere-se aos intervalos de frequência que são atribuídos ao serviço de radiodifusão de TV, mas que não são utilizados temporalmente em uma determinada área. Neste trabalho propõe-se o uso de TVWS como banda de operação de femtocélulas cognitivas 5G visando eliminar a interferência causada à rede macrocelular. Para isso, inicialmente, foi analisado teoricamente a compatibilidade do sistema 5G NR com a banda de TVWS. Através de medições de campo foi levantada uma visão da ocupação espectral da banda de TV (470 MHz - 698 MHz) na cidade de São Paulo. Esse levantamento mostrou a existência de uma faixa espectral de 126MHz não utilizado em ambientes interiores. A coexistência entre femtocélulas operando em TVWS e o sistema de TV foi analisada em distintos cenários. Em co-canal foi encontrado que é necessária uma certa distância (500m a 1 Km) entre o receptor de TV e o transmissor do sistema femtocelular para evitar interferências. Em canal adjacente, com femtocélulas operando em baixa potência (11dbm), não há interferência significativa perto da estação de TV. Uma nova arquitetura para encontrar TVWS em ambientes interiores é proposta. Esta arquitetura é baseada em banco de dados e tem a vantagem frente a outros métodos de sensoriamento espectral de não utilizar a geolocalização. Finalmente, uma prova de conceito da arquitetura proposta foi desenvolvida utilizando rádios definidos por software. Os padrões utilizados para este estudo foram o padrão de televisão digital ISDB-Tb e o sistema celular de quinta geração 5G (IMT-2020).

Palavras-chave: Femtocélulas, 5G, TV White Space, Rádio Cognitivo, TV Digital.

ABSTRACT

Femtocells have been proposed to increase the capacity of the cellular network, usually in indoor environments. They are not part of cellular planning but use the same operating frequency as the macrocellular network. Thus, they can cause interference in the system, and reducing this interference is one of the biggest challenges currently existing. On the other hand, TV White Space (TVWS) refers to the frequency ranges assigned to the TV broadcasting service but that are not used temporarily in a given area. In this work, we propose using TVWS as an operating band of 5G cognitive femtocells to eliminate the interference caused to the macrocellular network. Initially, the compatibility of the 5G NR system with the TVWS band was theoretically analyzed. Through field measurements, a view of the spectral occupation of the TV band (470 MHz - 698 MHz) in the city of São Paulo was raised. This survey showed the existence of a spectral band of 126MHz not used in indoor environments. The coexistence between femtocells operating in TVWS and the TV system was analyzed in different scenarios. In co-channel, a certain distance (500m to 1 km) is needed between the TV receiver and the transmitter of the femtocellular system to avoid interference. There is no significant interference near the TV station in an adjacent channel with femtocells operating at low power (11dbm). A new architecture to find TVWS indoors is proposed. This architecture is based on a database and has the advantage over other spectral sensing methods of not using geolocation. Finally, a proof of concept of the proposed architecture was developed using software defined radios. The standards used for this study were the ISDB-Tb digital television standard and the 5th generation cellular system 5G (IMT-2020).

Keywords: Femtocells, 5G, TV White Space, Cognitive Radio, Digital Television.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Redes sem fio da próxima geração 5G	25
Figura 2 – Características principais do 5G e casos de uso	25
Figura 3 – Cenário típico das femtocélulas	27
Figura 4 – Cenários de interferência de femtocélulas	.29
Figura 5 – Descrição geral do funcionamento do Rádio Cognitivo	.31
Figura 6 – Ciclo cognitivo	.32
Figura 7 – Problema do terminal escondido	.33
Figura 8 – Banda alocada para LTE 700MHz	36
Figura 9 – TV White Spaces	36
Figura 10 – Comparação de interferência de dois esquemas	.40
Figura 11 – Femtocélulas operando em TVWS	.41
Figura 12 – Definição da largura de banda e sua configuração para um canal 5G N	١R
	.42
Figura 13 – TVWS em quatro cidades do Reino Unido	.48
Figura 14 – Local de medição na cidade de São Paulo	.49
Figura 15 – Espectro de RF de canais de TV em um ambiente interior em São Pau	ulo
	.50
Figura 16 – Intensidade do sinal dos canais de TV digital na banda UHF	.50
Figura 17 – Qualidade do sinal dos canais de TV digital na banda UHF	.51
Figura 18 – Banda Segmentada BST – OFDM para TV Digital	.58
Figura 19 – Exemplo de transmissão com banda segmentada	.59
Figura 20 – Elementos simulados em SEAMCAT	.62
Figura 21 – Níveis de sinal desejado e interferente	.63
Figura 22 – Máscaras espectrais	.65
Figura 23 – Máscara do espectro de transmissão para radiodifusão de TV digital	67
Figura 24 – Máscara espectral crítica da TV Digital em SEAMCAT	.68
Figura 25 – Deslocamento de frequência de TV	.68
Figura 26 – Interferência Co-canal	.72
Figura 27 – Interferência canal adjacente	.73
Figura 28 - Influência do sistema femtocelular em co-canal com o sistema de TV.	.76
Figura 29 – Número de amostras geradas	.76
Figura 30 – Cenário do caso 1 em SEAMCAT	.77
Figura 31 – Função de distribuição cumulativa para 479, 581 e 677 MHz	.78
Figura 32 – Função densidade de probabilidade - CH48 (677,142856 MHz)	.78
Figura 33 – CDF para 50, 100, 200, 500 e 1000 m de distância entre o receptor de	Э
TV e a FBS, caso 1	.79
Figura 34 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância entre o	
receptor de TV e a FBS, caso 2	.80
Figura 35 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância entre o	
receptor de TV e a FBS, caso 3	.81

Figura 36 – PDF dos sinais recebidos pelo receptor de TV (dRSS e iR de 200m. caso 3	SS), distância 82
Figura 37 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância e receptor de TV e a FBS, caso 4	entre o 83
Figura 38 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância e receptor de TV e a FBS, caso 5	entre o 84
Figura 39 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância e receptor de TV e a FBS, caso 6	entre o 85
Figura 40 – Influência do sistema femtocelular em canal adjacente cor TV	n o sistema de 86
Figura 41 – Cenário do caso 7 em SEAMCAT	87
Figura 42 – Função densidade de probabilidade para dRSS e iRSS, ca	aso 787
Figura 43 – CDF para 0,5m; 1m; 1,5m; 2m; 2,5m e 3 m de distância ei	ntre o receptor
de TV e a FBS, e 100m entre o transmissor e receptor de	TV, caso 788
Figura 44 – CDF para 0,5m; 1m; 1,5m; 2m; 2,5m e 3 m de distância ei	ntre o receptor
de TV e a FBS, e 10 Km entre o transmissor e receptor de	+ TV, caso 7.89
Figura 45 – Sensoriamento espectral auxiliado por banco de dados	95
Figura 46 – Pd e Pfa × SNR para canais AWGN (esquerda) e desvane	ecimento
Rayleigh (direita)	
Figura 47 – Potências aleatórias para 37 canais	100
Figura 48 – Números BEED para 37 possibilidades de ocupação	100
Figura 49 – Cenário topológico da proposta	101
Figura 50 – Função de distribuição cumulativa para 7 distâncias, cená	rio urbano .102
Figura 51 – Cenário da proposta com femtocélulas	103
Figura 52 – Arquitetura lógica do sistema proposto	104
Figura 53 – Operação da arquitetura de banco de dados proposto	105
Figura 54 – Arquitetura de SDR	107
Figura 55 – Protótipo da proposta	109
Figura 56 – Plataforma experimental - Ettus.	109
Figura 57 – Diagrama de blocos para um Canal de TV em GNU Radio	[,] 110
Figura 58 – Espectro de TV no domínio do tempo	110
Figura 59 – Espectro de TV no domínio da frequência	111
Figura 60 – Sensoriamento espectral em GNU Radio	111
Figura 61 – Resultados do sensoriamento espectral para um canal de	TV112
Figura 62 – Baixo número de amostras	113
Figura 63 – Número intermediário de amostras	113
Figura 64 – Alto número de amostras	113
Figura 65 – Envio de relatórios ao servidor de TVWS em GNU Radio .	114

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project		
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações		
ATSC	Comitê para Sistema de TV Avançada		
	(em inglês, Advanced Television System Committee)		
BS	Estação Base		
	(em inglês, Base Station)		
CDF	Função Distribuição Cumulativa		
	(em inglês, Cumulative Distribution Function)		
CR	Rádio Cognitivo		
	(em inglês, Cognitive Radio)		
DAS	Acesso Dinâmico ao Espectro		
	(em inglês, Dynamic Spectrum Access)		
DL	Downlink		
DSL	Linha Digital de Assinante		
	(em inglês, Digital Subscriber Line)		
DVB-T	Transmissão de Vídeo Digital – Terrestre		
	(em inglês, Digital Video Broadcasting – Terrestrial)		
ECC	Comitê de Comunicações Eletrônicas		
	(em inglês, Electronic Communications Committee)		
ECMA	Associação Europeia de Fabricantes de Computadores		
	(em inglês, European Computer Manufacturers Association)		
EIRP	Potência Isotrópica Radiada Equivalente		
	(em inglês, Effective Isotropic Radiated Power)		
ETSI	Instituto Europeu de Normalização na área de Telecomunicações		
	(em inglês, European Telecommunications Standards Institute)		
FBS	Estação Base Femtocelular		
	(em inglês, Femtocell Base Station)		
FCC	Comissão Federal de Comunicações		
	(em inglês, Federal Communications Comission)		

HeNB	Home enhanced Node B
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
	(em inglês, The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
ISDB-T	Serviço Integrado de Transmissão Digital Terrestre
	(em inglês, Integrated Services Digital Broadcasting)
ITU	União Internacional de Telecomunicações
	(em inglês, International Telecommunication Union)
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
OFDM	Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal
	(em inglês, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
PU	Usuários Primários
	(em inglês, Primary Users)
SDR	Rádio Definido por Software
	(em inglês, Software Defined Radio)
SNR	Relação sinal-ruído
	(em inglês, Signal to Noise Ratio)
SINR	Relação Sinal-Ruído mais Interferência
	(em inglês, Signal to Interference plus Noise Ratio)
SU	Usuários Secundários
	(em inglês, Secondary Users)
TVWS	Espaços Livres na banda de TV
	(em inglês, TV White Spaces)
UE	Equipamento do Usuário
	(em inglês, User Equipment)
UP	Uplink
WSD	White Space Device

SUMÁRIO

Capítu	lo 1	14			
Introdu	ıção	14			
1.1.	Motivação	18			
1.2.	Identificação do Problema19				
1.3.	Objetivos da tese2				
1.4.	Justificativa21				
1.5.	Metodologia da pesquisa22				
1.6.	Organização da Tese22				
Capítu	lo 2	24			
Femto	células operando na banda de TV White Space	24			
2.1.	Tecnologia Celular 5G	24			
2.2.	Femtocélulas	26			
	2.2.1. Formas de uso das Femtocélulas	27			
	2.2.2. Desafios no uso das Femtocélulas	28			
	2.2.3. O problema da Interferência	29			
2.3.	Rádio Cognitivo	30			
	2.3.1. Operação do Rádio Cognitivo	31			
	2.3.2. Oportunidade de Espectro para Rádios Cognitivos	34			
2.4.	TV White Space	35			
	2.4.1. Regulação e Padronização	37			
	2.4.2. Aplicações de TVWS	38			
2.5.	Compatibilidade de Femtocélulas Cognitivas 5G em TVWS	39			
	2.5.1. Trabalhos relacionados	43			
	2.5.2. Desafios das Femtocélulas operando em TVWS	44			
2.6.	Conclusão	45			
Capítu	lo 3	47			
Ocupa	ção espectral da TV Digital em ambientes interiores	47			
3.1.	Trabalhos anteriores	47			
3.2.	Metodologia	49			
3.3.	Medições de ocupação da banda de TV	49			
3.4.	Conclusão52				
Capítu	lo 4	54			

Análise	e de Interferência com o sistema de TV	54		
4.1.	Estado da Arte	55		
4.2.	Caracterização do canal	56		
	4.2.1. Padrão ISDB-TB	58		
	4.2.2. Classificação das Estações de TV	60		
4.3.	Metodologia	61		
	4.3.1. SEAMCAT	62		
	4.3.2. Método de Monte Carlo	62		
	4.3.3. Critérios de Interferência	63		
	4.3.4. Máscaras espectrais	64		
4.4.	Parâmetros de simulação	65		
	4.4.1. Parâmetros do sistema de TV	65		
	4.4.2. Parâmetros do sistema femtocelular 5G NR	70		
	4.4.3. Modelos de propagação	71		
4.5.	Cenários de simulação	72		
	4.5.1. Processo de Simulação	75		
	4.5.2. Influência do Sistema femtocelular 5G NR sobre o sistema de TV	76		
4.6.	Conclusão	89		
Capítu	lo 5	91		
Arquite	etura proposta para encontrar canais livres de TV	91		
5.1.	Metodologias para encontrar TVWS	92		
	5.1.1. Sensoriamento espectral	92		
	5.1.2. Sensoriamento espectral auxiliado por banco de dados	93		
5.2.	Metodologia proposta	96		
	5.2.1. Sensoriamento espectral bayesiano	97		
	5.2.2. Cenário topológico	101		
	5.2.3. Arquitetura lógica de comunicação	103		
	5.2.4. Operação do banco de dados de TVWS	104		
5.3.	Conclusão	105		
Capítu	lo 6	107		
PoC da	a arquitetura proposta utilizando plataformas de SDR	107		
6.1.	Equipamentos usados no Protótipo	108		
6.2.	Descrição do Protótipo108			
6.3.	Processo de implementação109			
6.4.	Conclusão	114		

Capítulo 7		
Conclu	sões e Trabalhos Futuros	115
7.1.	Conclusões	115
7.2.	Trabalhos Futuros	116
Referências117		

Capítulo 1 Introdução

O espectro eletromagnético foi tornando-se um recurso bastante escasso devido ao surgimento de um número crescente de sistemas de telecomunicações, que foram evoluindo para abastecer a crescente demanda por mais capacidade de comunicação sem fio.

Uma tecnologia em constante evolução é a telefonia celular, que através das tecnologias 2G, 3G e 4G, foi fazendo um uso cada vez mais eficiente do espectro, melhorando assim a capacidade de comunicação. A próxima geração 5G deverá proporcionar taxas de dados muito altas, latência extremadamente baixa e suporte para conexão massiva de dispositivos.

Um desafio em redes celulares é fornecer capacidade de comunicação em ambientes interiores¹, onde a qualidade do serviço não é comumente controlada [1]. Nesses ambientes a cobertura é geralmente baixa, pois o sinal é atenuado ao atravessar as paredes dos prédios, principalmente nas bordas das células. Considerase que a perda do sinal ao passar de um ambiente exterior para um ambiente interior é de até 20dB [2].

Estudos em 2008, mostraram que mais de 50% das chamadas de voz e mais de 70% das comunicações de dados tinham origem em ambientes interiores [3]. Em 2015 [4], mais de 80% dos dados móveis foram consumidos em ambientes interiores, além disso, foi descoberto que o tráfego em ambientes interiores está crescendo 20% mais rápido do que o tráfego em ambientes exteriores, e que essa tendência vai continuar. Ademais, estatísticas mostraram que mais de 70% dos serviços em 4G ocorrem em ambientes fechados, e as previsões da indústria mostram que essa porcentagem

¹ Nesta tese considera-se o termo interior como a tradução do inglês da palavra *indoor.*

ultrapassará 80% à medida que o 5G difunda sua diversidade de serviços [5]. Por outro lado, uma análise da Cisco previu que em 2019, quando as primeiras operadoras se preparavam para implantar redes 5G padronizadas, 96% de todos os dados iriam ser consumidos desde locais interiores [6], [7]. Esses estudos evidenciam que fornecer boa capacidade de comunicação e cobertura em ambientes interiores será uma parte essencial para os operadores de rede.

Em comunicações sem fio, a capacidade depende da eficiência espectral, largura de banda e o tamanho da célula [8]. No entanto, atualmente os sistemas celulares evoluíram até o ponto em que uma estação base atinge um desempenho quase ideal, onde as tecnologias de comunicação estão no limite imposto pelo teorema de Shannon. Uma forma de melhorar a capacidade de uma rede celular tradicional é aumentando o número de estações base e diminuindo suas áreas de cobertura. Assim, fazendo uma alocação inteligente de recursos, os mesmos canais de frequência podem ser utilizados em distintas regiões ou células homogêneas, porém esta solução enfrenta desafios econômicos [9].

Uma outra forma de melhorar a capacidade do sistema e cobertura da rede foi introduzida no 3GPP LTE-A (*3rd Generation Partnership Project Long-Term Evolution-Advanced*) chamada de Rede Heterogênea *(Heteregeneous network - HetNet)* [10] [11]. Nas HetNets, estações base macrocelulares, que comumente transmitem com níveis altos de potência (~5W – 40W), são sobrepostas com estações base que transmitem com níveis de potência substancialmente mais baixos (~100mW - 2W) [12].

Estações base de menor potência são conhecidas como microcélulas e picocélulas, elas devem ser conectadas com o núcleo da rede mediante enlaces de *backhaul* de alta velocidade e confiabilidade, todavia, fornecer esse tipo de *backhaul* é custoso [13], pois é necessário uma infraestrutura adicional. Assim, elas não são amplamente implantadas em ambientes interiores.

Dessa forma, surgiram as femtocélulas [14], que é uma solução de baixo custo, pois são conectadas ao núcleo da rede mediante uma linha ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*). Elas são de baixa potência, de menor alcance e de fácil instalação. Foram pensadas para melhorar a cobertura em ambientes domésticos, onde as macrocélulas são ineficientes. Além disso, sua instalação permite também diminuir o

tráfego macrocelular. A arquitetura femtocelular envolve o uso de duas camadas [15]: A camada macrocelular convencional (macrocélulas, microcélulas e picocélulas) e a camada das femtocélulas. Em uma rede ideal, as duas camadas devem coexistir compartilhando a mesma faixa de frequência licenciada.

No entanto, existe um desafio na implementação de femtocélulas, como são equipamentos *plug and play* (PnP), elas podem ser instaladas em qualquer lugar pelos usuários, podendo assim provocar interferências entre as duas camadas [16], [17]. Essas interferências são classificadas em dois tipos: interferência *cross-tier* (entre femtocélula e macrocélula) e interferência *co-tier* (entre duas o mais femtocélulas) [14], [18], [19], [20]. Gerenciar essa rede heterogênea de modo a evitar interferências é importante para não afetar significativamente o rendimento de toda a rede celular.

Algumas propostas para tentar solucionar o problema da interferência são: reutilização de frequência (*Fractional Frequency Reuse*), controle de potência de transmissão (*Power Control*), e programação de frequência colaborativa (*Collaborative frequency scheduling*) [21]. Porém, essas propostas acrescentam complexidade ao sistema e não conseguem solucionar eficientemente a questão das interferências. Nesse sentido, são necessárias novas tecnologias que permitam aproveitar os benefícios da coexistência dessas redes heterogêneas sem causar interferências mútuas.

Por outro lado, sabe-se que atualmente o espectro é alocado estaticamente aos provedores de serviços de telecomunicações através de licenças, e os proprietários desses serviços nem sempre utilizam o espectro o tempo todo. Esses espectros temporariamente livres são chamados de *White Spaces*.

Um espectro de interesse é do serviço de TV, devido à sua largura de banda e cobertura [22]; nesta banda, os intervalos de frequência que não são ocupados temporalmente são chamados de TVWS (*TV White Space*). Segundo [23], no Reino Unido, mais de 50% das localizações geográficas estão susceptíveis de ter mais de 150MHz de espectro de TVWS. Entidades reguladoras como a FCC (*Federal Communications Commission*) e a Ofcom (*Office of Communications*) autorizaram a reutilização da banda de TVWS para outros serviços, desde que não interfiram com o sistema licenciado de TV.

Para ser possível a reutilização desses intervalos livres de frequência, uma tecnologia chamada de rádio cognitivo (*Cognitive Radio - CR*) foi proposta na literatura. A tecnologia de CR permite fazer melhor uso do espectro eletromagnético mediante um acesso dinâmico. No CR definem-se dois tipos de usuários do espectro: usuários primários e usuários secundários. Os primários são usuários licenciados cuja frequência de operação é alocada estaticamente. Os usuários secundários conseguem reconfigurar seus parâmetros de transmissão para poder utilizar faixas do espectro alocadas aos usuários licenciados quando eles não as estiverem utilizando. Esses usuários também são chamados usuários oportunistas.

Um dos maiores desafios para o funcionamento ótimo de um CR é que os usuários oportunistas não devem interferir no desempenho dos serviços licenciados. Assim, o CR deve ter a capacidade de determinar se um canal está ocupado ou não, para isso, deve detectar eficientemente até os sinais mais baixos dos usuários licenciados [24].

Para encontrar canais livres, técnicas de sensoriamento espectral para CR foram estudadas na literatura, porém, entidades regulamentares recomendam como método principal a utilização de banco de dados de geolocalização, deixando as técnicas de sensoriamento espectral opcionais [23], [25]. No entanto, em ambientes interiores, onde as femtocélulas são comumente instaladas, a geolocalização não é adequada, sendo necessária novas técnicas para encontrar TVWS nesses ambientes.

Neste trabalho propõe-se uma solução as interferências em redes celulares HetNet, que consiste na mudança da banda de operação das femtocélulas para a banda de TVWS utilizando a tecnologia de CR. No entanto, essa mudança introduz novos desafios que precisam ser enfrentados para que femtocélulas cognitivas possam ocupar a banda de TVWS e coexistir com o sistema de TV.

Para isso, inicialmente é estudado teoricamente a compatibilidade do sistema femtocelular com a banda de TVWS. Além disso, analises computacionais de coexistência entre femtocélulas cognitivas operando em TVWS e o sistema de TV são apresentados. Propõe-se também uma nova arquitetura para encontrar TVWS em ambientes interiores sem uso da geolocalização. Finalmente uma prova de conceito da arquitetura proposta foi desenvolvida utilizando rádios definidos por software. Os

padrões utilizados para este estudo foram o padrão de televisão digital ISDB-Tb e o sistema celular de quinta geração 5G (IMT-2020).

1.1. Motivação

Atualmente o padrão do sistema celular 5G está sendo desenvolvido para operar em dois grupos de frequência: FR1 na faixa de 410 MHz até 7125 MHz e FR2 na faixa de 24250 MHz até 52600 MHz [26], [27].

Ademais, devido às características de propagação das ondas eletromagnéticas, as faixas de frequência de 30 MHz a 5 GHz são alocadas comumente a serviços de telecomunicações de área metropolitana. Por outro lado, frequências maiores são geralmente destinadas para sistemas de comunicação de curta distância. Assim, é natural pensar que as faixas de frequências de TV (470 – 698MHz) idealmente sejam utilizadas para áreas grandes. Então, por que motivo propor um sistema femtocelular 5G de curto alcance na banda de frequências livres de TV?

Alguns pontos que motivam esta proposta são:

- Escassez de cobertura e capacidade celular em ambientes interiores: há uma grande demanda por serviços de comunicação em ambientes interiores, onde o espectro eletromagnético é escasso e o desempenho do sistema macrocelular é ineficiente.
- Consumo de energia: além da massificação dos *smartphones*, dispositivos de Internet das coisas (IoT) estão sendo amplamente implantados, muitas delas para aplicações em ambientes interiores. Esses dispositivos de IoT precisarão de uma potência maior para se conectar à rede macrocelular, gastando a carga limitada de bateria. Desta forma serão necessárias tecnologias de comunicação que forneçam cobertura e capacidade de rede para ambientes interiores, e que permitam poupar a energia das baterias dos dispositivos.

Por outro lado, os operadores de rede estão muito interessados em diminuir o consumo de energia de suas redes, tanto de suas infraestruturas quanto dos dispositivos dos usuários. Esses métodos para reduzir o consumo de energia estão sendo estudados na literatura sob o termo *Green Communication* na literatura.

- Sistemas de localização em ambientes interiores: muitas das aplicações de loT utilizarão a localização na sua operação. É sabido que os sistemas de posicionamento por satélite não funcionam adequadamente em ambientes interiores. Por outro lado, desenhar um sistema de localização usando ondas milimétricas em ambientes interiores é um desafio atual devido a suas limitadas características de propagação. Utilizar frequências mais baixas em um sistema de localização pode aprimorar o desempenho.
- Robustez: na indústria 4.0, está sendo planejado o uso da tecnologia 5G para melhorar a automatização das fábricas. Devido ao entorno de operação, menores frequências como a banda UHF são mais robustas que as ondas milimétricas.
- Real utilização da banda de TVWS: a utilização da banda de TVWS usando CRs foi estudado na literatura, especialmente para áreas rurais. Porém, em áreas rurais o espectro não é escasso e o uso de CRs é desnecessário nesses ambientes. Consideramos que a real utilização dos CRs é dada em cenários urbanos, onde o espectro é realmente escasso.

A banda de TVWS também foi estudada para sua utilização em cenários urbanos metropolitanos, como, por exemplo, a utilização do TVWS como banda de operação das macrocélulas; porém, os estudos de coexistência entre o sistema macrocelular e o sistema de TV concluíram que, devido à alta potência das macrocélulas, elas podem causar interferência no sistema de TV. Para evitar essas interferências, é necessário a implantação de filtros nos receptores de TV, aumentar a banda de guarda ou diminuir a potência de transmissão das macrocélulas [28], [29].

 Estado da banda de TV em ambientes interiores: segundo estudos, existe um número considerável de canais de TV que não estão sendo ocupados nesses ambientes, onde existe maior demanda de espectro e maior escassez.

Por esses motivos consideramos que o uso do TVWS como banda de operação das femtocélulas em ambientes interiores pode trazer vantagens.

1.2. Identificação do Problema

Ao fazer a mudança da banda de operação das femtocélulas para a banda de TVWS, surgem inicialmente algumas perguntas: *i*) como encontrar canais livres de TV

em ambientes interiores? *ii*) São estes intervalos de TVWS suficientes para o funcionamento de femtocélulas? *iii*) Como alocar os canais livres aos usuários das femtocélulas? *iv*) Em que situações os equipamentos dos usuários (UE – *User Equipment*) devem mudar sua frequência de operação (frequência celular licenciada ou TVWS)? *v*) Como proteger o sistema de TV? *vi*) Qual deve ser a máxima potência de transmissão do sistema femtocelular?

Esses desafios podem ser classificados em [30]:

- Obtenção de informação de espectro de TVWS disponível em ambientes interiores:
 - o Utilização da tecnologia de CR em femtocélulas;
 - Aperfeiçoamento do sensoriamento espectral da banda de TV em ambientes interiores.
- Esquema de alocação de recursos de TVWS disponíveis:
 - Estudo de integração das femtocélulas com o núcleo da rede;
 - Algoritmos de decisão da frequência de operação do sistema femtocelular (banda celular ou TVWS);
 - o Metodologias para a coexistência entre femtocélulas e macrocélulas.
- Metodologias para evitar a interferência no sistema de TV:
 - o Estudos de características de propagação em ambientes indoor;
 - Determinação dos limites do sistema femtocelular para evitar interferência no sistema de TV;
 - o Algoritmos para determinar a máxima potência de transmissão permissível.

Nesta tese pretende-se responder algumas dessas questões conforme os objetivos propostos.

1.3. Objetivos da tese

O objetivo desta pesquisa é propor a mudança da banda de operação de femtocélulas 5G para a banda de *TV White Space* utilizando a tecnologia de rádio cognitivo. Para isso, estudamos a coexistência com o sistema de TV e propomos uma nova arquitetura para encontrar canais livres de TV em ambientes interiores sem uso da geolocalização. Para as análises, consideramos o padrão celular 5G (IMT-2020) e o padrão de TV digital ISDBT-TB.

Os objetivos específicos são:

- Analisar teoricamente a possibilidade de coexistência entre o Sistema de TV e o sistema femtocelular operando em TVWS;
- Realizar medições da banda do sistema de TV em ambientes interiores, para estimar a ocupação espectral nessa banda;
- Analisar, mediante cálculos matemáticos e simulações, o impacto do sistema femtocelular operando em TVWS nos sistemas de TV através de uma perspectiva de interferência;
- Propor uma nova arquitetura para que o sistema femtocelular cognitivo possa encontrar TVWS em ambientes interiores sem uso da geolocalização;
- Implementar uma prova de conceito da arquitetura proposta usando equipamentos de rádio definidos por software (SDR – Software Defined Radio).

1.4. Justificativa

No tópico de femtocélulas cognitivas com tecnologias 5G operando na banda de TVWS há perguntas que ainda não foram respondidas completamente na literatura. Algumas justificativas dos objetivos desta tese são:

- Existe poucos trabalhos na literatura sobre femtocélulas com tecnologia 5G na banda de TVWS, representando assim uma oportunidade para pesquisa;
- Faltam na literatura medições de campo que permitam conhecer o real estado do espectro alocado para o serviço de TV, especialmente em ambientes interiores;
- Faltam na literatura trabalhos de coexistência entre um sistema femtocelular operando em TVWS e um sistema de TV, que permitam conhecer se essa mudança de frequência causará algum tipo de interferência em ambos sistemas;
- Não existem arquiteturas para o funcionamento de femtocélulas operando na banda de TVWS em ambientes interiores;

- A diferença das microcélulas/picocélulas com as femtocélulas é que as últimas não fazem parte do planejamento da rede, e assim a operadora desconhece sua localização exata. Por esse motivo devem ser tratadas de maneira diferente;
- Como as femtocélulas são dispositivos plug and play, elas podem ser implantadas em qualquer local pelo usuário. Por esse motivo são necessárias propostas de novas arquiteturas que permitam alocar recursos de espectro ao sistema femtocelular cognitivo sem depender da geolocalização;
- Existem poucos estudos sobre proteção do sistema de TV relacionados ao uso de femtocélulas;
- Por último, a maioria de trabalhos relacionados são teóricos e de simulações, existindo poucos trabalhos experimentais no tema.

1.5. Metodologia da pesquisa

- Para a análise teórica foi feita uma pesquisa abrangente sobre o tópico tratado;
- Foram feitas experimentalmente medições de campo sobre o estado atual do espectro de TV em ambientes interiores, usando analisadores de espectro, receptores comerciais e equipamentos de SDR;
- Para a análise de coexistência espectral do sistema femtocelular com o sistema de TV, foram feitos cálculos matemáticos e simulações computacionais baseados no método de Monte Carlo, utilizando a ferramenta computacional SEAMCAT a fim de analisar se existe algum tipo de interferência;
- Para a prova de conceito foi utilizado o software GNU Radio junto com equipamentos de SDR.

1.6. Organização da Tese

Para o desenvolvimento deste trabalho, no capítulo 2 foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tópico em questão e uma análise teórica sobre a possibilidade de utilizar a banda de TVWS em um sistema femtocelular com tecnologia 5G.

No Capitulo 3, são apresentadas medições de campo do espectro do sistema de TV em ambientes interiores, para obter uma visão do número de canais que não estão sendo ocupados no Brasil.

No capítulo 4, se faz uma análise matemática e com simulações sobre a coexistência do sistema femtocelular 5G operando em TVWS e o sistema de TV.

No capítulo 5, é apresentada uma nova arquitetura para que o sistema femtocelular cognitivo possa encontrar canais livres, sem fazer uso da localização.

No capítulo 6, é implementada uma prova de conceito dessa arquitetura proposta utilizando equipamentos de SDR.

Finalmente, o capítulo 7 contém as conclusões do estudo, assim como as sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2 Femtocélulas operando na banda de TV White Space

A introdução de novas aplicações de comunicação, como realidade virtual, realidade aumentada, Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*), comunicações de dispositivo a dispositivo (*Device to Device – D2D*), comunicação máquina a máquina (*Machine to Machine – M2M*), saúde, educação, indústria 4.0, etc., criarão uma carga significativa em redes celulares atuais como o 4G. Por outro lado, o aumento do uso do *smartphones* está sendo exponencial sobretudo em vídeo [8].

Enquanto redes LTE (*Long Term Evolution*) foram planejadas para suportar uma certa quantidade de usuários conectados, as novas aplicações demandam milhares de dispositivos conectados em uma única célula. Dessa forma, o uso de redes heterogêneas está sendo cada vez mais necessário; estas redes heterogêneas incialmente pensadas para tecnologia LTE, na tecnologia 5G devem massificar-se. Um cenário importante onde essas aplicações terão impacto é nos ambientes interiores, femtocélulas podem melhorar o rendimento da rede nesses locais, porém, sua implementação pode causar interferências com o sistema macrocelular [17], [20].

Neste Capitulo é discutida a possibilidade de que femtocélulas possam usar a banda de TVWS como banda de operação em ambientes interiores para evitar interferências com a rede macrocelular. Discutiremos a tecnologia 5G, o uso de femtocélulas, e a oportunidade de utilização da banda de TVWS usando CRs.

2.1. Tecnologia Celular 5G

A tecnologia celular de quinta geração 5G visa fornecer taxas de transmissão muito altas, latência extremadamente baixa, melhoria na qualidade de serviço, diminuição no consumo de energia tanto da rede como nos dispositivos, entre outros. A Figura 1 mostra os cenários e as arquiteturas da rede 5G.





Fonte: [8]

A tecnologia 5G está baseada em três características principais: Banda larga móvel aprimorada (*eMBB - Enhanced Mobile Broadband*), comunicações massivas de tipo de máquina (*mMTC - Massive Machine Type Communication*) e, comunicações ultra-confiáveis e de baixa latência (*uRLL - Ultra-Reliable Low Latency Communication*). A Figura 2 ilustra as características principais do 5G e alguns exemplos de cenários de uso previstos para esta tecnologia.





Fonte: [31]

Oito requisitos principais podem ser identificados para os sistemas da próxima geração celular 5G [8], [32], [33]:

- Taxa de dados de 1 a 10 Gbps, que aumenta quase 10 vezes a taxa de dados de pico teórico da rede LTE;
- Latência de 1 ms, que reduz quase 10 vezes o tempo de ida e volta do 4G;
- Elevada largura de banda em uma unidade de área, para habilitar um grande número de dispositivos conectados com maiores larguras de banda;
- Suporte para conexão de um grande número de dispositivos. As redes 5G emergentes precisam fornecer conectividade a milhares de dispositivos de loT em uma certa área;
- Disponibilidade percebida de 99,999%. O 5G deve garantir que a rede sempre esteja disponível;
- Quase 100% de cobertura para conectividade. As redes sem fio 5G precisam garantir uma cobertura completa, independentemente da localização dos usuários;
- Redução no consumo de energia em quase 90%, que será ainda mais crucial com altas taxas de dados e conectividade massiva;
- Alta duração da vida útil da bateria: a redução no consumo de energia por dispositivos é fundamental, especialmente em dispositivos de IoT.

Femtocélulas podem ajudar a que esses pontos sejam atingidos nos sistemas 5G em ambientes interiores.

2.2. Femtocélulas

Femtocélulas são dispositivos de baixo custo e baixa potência e, por serem unidades *plug and play*, elas podem ser instaladas pelos próprios usuários [14], para serem utilizadas como estações base residenciais de curto alcance. Elas estão ligadas à rede celular através de uma conexão de banda larga similar ao WiFi e foram pensadas para cumprir dois objetivos: melhorar a cobertura e a capacidade em ambientes interiores e diminuir o tráfego na rede macrocelular.

Segundo a 3GPP, femtocélulas são estações base domésticas conhecidas como HNB (*Home Node B*) na tecnologia 3G, e HeNB (*Home Enhanced Node B*) na tecnologia LTE 4G [34]. Também são conhecidas na literatura como FAP (*Femtocell Access Points*) e FBS (*Femtocell Base Station*).

A Figura 3 mostra o cenário típico do uso de femtocélulas. Idealmente femtocélulas operando em ambientes interiores devem ser capazes de coexistir com a rede macrocelular operando em ambientes externos.



Figura 3 – Cenário típico das femtocélulas

Fonte: Do autor

O conceito de femtocélulas, suas características e o impacto da sua implementação foi estudado na literatura [3], [14], [35], [15].

Femtocélulas trazem benefícios para os operadores e usuários. Segundo [15], os operadores de rede terão uma enorme economia tanto de CAPEX (*Capital Expenditure*) como de OPEX (*Operational Expenditure*), além de uma redução considerável no tráfego macrocelular e oferecer cobertura celular em lugares de difícil conexão. Os assinantes também serão beneficiados por uma FBS devido à proximidade do transmissor e receptor, tendo serviços de alta velocidade, e aumentando a vida útil da bateria dos dispositivos móveis.

2.2.1. Formas de uso das Femtocélulas

Como as femtocélulas não fazem parte do planejamento celular [15], [36], [37], ter uma conexão dedicada abre novas formas de aplicações, algumas características a ser consideradas são:

 Acesso público ou privado: Em um acesso público, a femtocélula pode oferecer serviço a qualquer usuário que esteja perto dele. Em um acesso privado, somente um grupo limitado de assinantes (CSG - Close Subscriber Group) poderão usá-la;

- Canal dedicado ou compartido: Femtocélulas podem operar compartilhando canais com as macrocélulas ou podem ter canais dedicados para seu funcionamento;
- Potência máxima de transmissão fixa ou adaptativa: Deve ser escolhida para prevenir interferência.

Segundo essas características, podem ser escolhidas configurações para o funcionamento das femtocélulas:

- Configuração A: Acesso privado, canal dedicado e potência de transmissão fixa;
- Configuração B: Acesso privado, canal dedicado e potência de transmissão adaptativa;
- Configuração C: Acesso privado, canal compartido, potência de transmissão adaptativa;
- Configuração D: Canal compartilhado parcialmente. Faz-se uso híbrido entre canal dedicado e canal compartilhado. A femtocélula compartilha frequências com a macrocélula, mas a macrocélula terá maior prioridade de ocupação espectral;
- Configuração E: Acesso aberto, canal dedicado ou compartido.

2.2.2. Desafios no uso das Femtocélulas

Alguns desafios são apresentados a seguir [38], [39]:

- Definição das políticas de acesso: Modo de acesso público, privado ou híbrido;
- Administração de recursos: devido à baixa capacidade computacional das femtocélulas, existe uma limitação no agendamento de recursos;
- Sincronização: femtocélulas precisam de métodos para conseguir estar sincronizadas com a rede a fim de evitar sobreposição de períodos de transmissão;
- Segurança: como a femtocélula se comunica com a rede através de uma conexão de banda larga, esses dados são vulneráveis a ataques provenientes de internet;
- Mobilidade do usuário: devido ao incremento do número de femtocélulas, a mobilidade do usuário acrescentará os *handover* na rede, esse procedimento demanda maiores recursos;
- Interferência: femtocélulas não fazem parte do planejamento celular, logo, elas podem causar interferência com as macrocélulas.

2.2.3. O problema da Interferência

Interferências entre femtocélulas e macrocélulas podem ocorrer pois, ambas utilizam a mesma banda de frequência licenciada do sistema celular. Essa interferência pode ocorrer em lugares onde a femtocélula possua uma má localização ou exista um grande número de femtocélulas sobrepostas na área da macrocélula.

Existem dois tipos de interferência em uma rede composta de femtocélulas: *Cross-tier* e *Intratier* ou *Co-tier* [18], [16]. A interferência *Cross-tier* ocorre entre a macrocélula e a femtocélula. A interferência *Co-tier* ocorre entre femtocélulas vizinhas. A Figura 4 ilustra essas duas interferências.





Fonte: Do autor

Algumas técnicas típicas que pretendem mitigar o problema da interferência são:

- Reutilização de Frações de Frequência (*Fractional Frequency Reuses*): trata-se de uma partição do recurso. A ideia é dividir todo o espectro de frequências em várias sub-faixas, onde cada uma é alocada de forma diferente a sub-áreas que podem ser de macrocélulas ou femtocélulas [40].
- Controle de Potência (*Power Control method*): a potência de transmissão das femtocélulas é reduzida para não interferir. Uma vantagem é que com um ótimo controle de potência, tanto a macrocélula como a femtocélula poderia manter uma

boa qualidade de serviço (QoS) [41], [42], [43]. Em [44] e [45] são mostrados diversos cenários de como o controle de potência em uma rede que contém macrocélulas e femtocélulas pode reduzir a interferência entre elas.

- Programação de frequência colaborativa (*Collaborative Frequency Scheduling*): as femtocélulas recebem informação de programação da estação base macrocélula e comparam com seus resultados de detecção para encontrar oportunidades de espectro [46].
- Abordagem cognitiva: o uso de sensores distribuídos para compartilhar informações sobre o estado da rede macrocelular entre vizinhos HeNB [47]. Isto é, femtocélulas capazes de analisar o local para identificar e utilizar recursos de espectro que não estão sendo ocupados pela rede macrocelular. Porém, ambas redes (macrocelular e femtocelular) ainda operando na banda licenciada ao sistema celular.
- Femtocélulas operando em TVWS: A mudança de frequência de operação soluciona o problema de interferências com a rede macrocelular, mas abre novos desafios [48], [30]. Além disso, é necessário a tecnologia de CR.

2.3. Rádio Cognitivo

Joseph Mitola introduziu o conceito de rádio cognitivo (*CR* – *Cognitive Radio*) em 1999 [49] como uma tecnologia onde um transceptor baseado em rádio definido por software (*SDR* – *Software Defined Radio*) pode alterar seus parâmetros de forma inteligente automaticamente, a fim de fazer uso de frequências temporalmente não usadas por usuários licenciados.

Existem várias definições para o CR, mas a definição mais adotada [50] é a da União Internacional de Telecomunicações (UIT) [51]. Um Sistema de Rádio Cognitivo é um sistema de rádio que usa uma tecnologia que permite ao sistema:

- Obter conhecimento de seu ambiente operacional e geográfico (capacidades cognitivas);
- Ajustar dinâmica e automaticamente seus parâmetros e protocolos de operação de acordo ao conhecimento obtido, a fim de atingir os objetivos predefinidos (características reconfiguráveis);
- Aprender dos resultados obtidos (capacidade de aprendizagem).

2.3.1. Operação do Rádio Cognitivo

Um CR deve ser capaz de identificar a disponibilidade de um espectro licenciado não utilizado e aproveitá-lo. O usuário licenciado é chamado de usuário primário (*PU – Primary User*); o usuário oportunista ou não licenciado é chamado de usuário secundário (SU – *Secondary User*). A Figura 5 mostra a operação de um CR, ele vai reconfigurando seus parâmetros para acessar ao espectro livre de forma dinâmica.



Fonte: Modificado de [52]

Para atender essas características, o CR deve possuir funções como [52]:

- Sensoriamento Espectral (Spectrum Sensing): permite saber quais faixas de frequência do espectro estão sendo ocupadas por usuários primários e quais podem ser consideradas como oportunidades de transmissão;
- Decisão do espectro (Spectrum Decision): permite analisar todas as faixas de frequência livres encontradas pelo sensoriamento espectral, e selecionar qual delas atende melhor aos requisitos de transmissão;
- Compartilhamento do Espectro (Spectrum Sharing): consiste no gerenciamento de forma imparcial do compartilhamento do espectro livre entre os diversos usuários secundários;
- Mobilidade Espectral (Spectrum Mobility): consiste na habilidade de, ao detectar a presença de um usuário primário, alterar seus parâmetros de transmissão para não causar interferência ao usuário licenciado.

A forma em que essas funções são utilizadas e conectadas é chamado de ciclo cognitivo. Vários tipos de ciclos cognitivos foram propostos na literatura, alguns deles podem ser encontrados em [49], [53] e [54]. Baseado nesses trabalhos, na Figura 6 propomos um ciclo cognitivo para o sistema femtocelular, onde o UE e a FBS realizam a operação do sensoriamento espectral; essas informações são analisadas e segundo os requisitos as frequências livres podem ser alocadas. Por outro lado, se no processo do sensoriamento espectral é detectado a presença do usuário licenciado, o espectro deve ser abandonado e novos recursos devem ser alocados para os usuários secundários.





A operação eficiente do CR depende principalmente da capacidade de encontrar espaços livres de espectro. Para realizar essa operação são conhecidos três métodos [55]:

a. Beacons

São dispositivos que podem transmitir dados apenas quando recebem um sinal de controle de uma estação de TV ou um transmissor fixo não licenciado, indicando que existem canais vazios dentro de sua área de serviço. A desvantagem desse método é que precisa de uma infraestrutura adicional.

Fonte: Do Autor

b. Sensoriamento Espectral

É um processo mediante o qual é feita a inspeção do espectro de forma dinâmica e contínua para encontrar espaços livres de espectro. As técnicas de sensoriamento podem se classificar em detecção local, detecção cooperativa e detecção baseada na interferência.

Na detecção local, o CR decide se há presença de sinais a partir de medições feitas por ele mesmo. Assim, existem três métodos principais utilizados:

- o CR não conhece nenhuma característica de transmissão do PU; nesse caso, a única forma de fazer o sensoriamento espectral é por meio da detecção do nível de energia;
- o CR conhece alguma característica do sinal de transmissão do PU, tal como sinais pilotos, tipo de modulação, dentre outras;
- o CR conhece as características do sinal do PU, ou seja, tem um conhecimento completo do sinal a ser detectado; nesse caso a utilização de um filtro casado seria ideal para a sua detecção.

Por outro lado, existe um problema que deve ser considerado quando se faz uma detecção local, e é o problema do terminal oculto, mostrado na Figura 7. Onde um SU que não consegue receber sinal do PU decide que dito canal está livre e começa sua transmissão podendo interferir com outros usuários primários.





c. Banco de dados de geolocalização

Devido ao problema do terminal escondido, foi proposta a utilização de banco de dados que forneça aos SU dados para a determinação de espectros livres. Assim, um banco de dados central, com informações da localização de PUs e SUs pode calcular e especificar uma lista de espectros disponíveis para serem usados por um SU em uma determinada área.

2.3.2. Oportunidade de Espectro para Rádios Cognitivos

Devido às características de propagação, nem toda a frequência é adequada para uso em telecomunicações. Na Tabela 1, mostra-se a alocação estática das bandas de frequência usadas em telecomunicações.

Nome	Sigla	Banda ITU	Frequência	Utilização
Frequência	ELF	1	3 a 30 Hz	Comunicações com submarinos
Extremamente				
Baixa				
Frequência	SLF	2	30 a 300 Hz	Comunicações com submarinos
Super Baixa				
Frequência	ULF	3	300 a 3.000 Hz	Comunicações dentro de minas
Ultra Baixa				
Frequência	VLF	4	3 a 30 KHz	Comunicações submarinas, detectores
Muito Baixa				de avalanches, monitores de
				batimentos cardíacos, geofísica
Frequência	LF	5	30 a 300 KHz	Navegação, sinais de tempo, ondas
Baixa				longas radiodifusão AM
Frequência	MF	6	300 a 3.000 KHz	Radiodifusão Ondas Médias AM
Média				
Frequência Alta	HF	7	3 a 30 MHz	Ondas Curtas, Rádio Amadores,
				Comunicações aeronáuticas além do
				horizonte
Frequência	VHF	8	30 a 300 MHz	Radiodifusão FM, TV, Comunicações
Muito Alta				aeronáuticas torre–avião em
				visibilidade, Comunicações
				aeronáuticas avião-avião

Tabela 1 – Bandas de frequência
Frequência	UHF	9	300 a 3.000 MHz	Radiodifusão TV, Fornos de micro-
Ultra Alta				ondas, telefones celulares, Redes
				Locais sem Fio (LAN), Bluetooth, GPS,
				Walkie-Talkies, Telefones sem Fio
Frequência	SHF	10	3 a 30 GHz	Dispositivos de Micro-ondas, Redes
Super Alta				Locais sem Fio (LAN), Radares,
Frequência	EHF	11	30 a 300 GHz	Radioastronomia, Links de Micro-ondas
Extremamente				
Alta				
Fonto: [56]	1	1	1	1

Fonte: [56]

Alguns trabalhos sobre ocupação do espectro foram feitos. Em [57] um estudo realizado para a faixa de frequências 75Hz a 3GHz revelou a ineficiência do uso do espectro alocado estaticamente, pois algumas faixas de frequências são bastante usadas e outras são pouco usadas. Em [58], medições feitas na faixa de frequências de 30MHz – 3000MHz, determinou uma ocupação global media temporal abaixo do 20%. Esses trabalhos demonstraram que uma grande parte do espectro licenciado está sendo pouco usado.

Por outro lado, tanto a FCC como o ETSI reconheceram a escassez do espectro disponível para poder alocar novos sistemas de comunicações licenciados. A banda não licenciada ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) também está muito congestionada, especialmente em ambientes interiores. É assim que a tecnologia de CR se apresenta como uma solução para um uso do espectro mais eficiente, um uso de forma dinâmica. Em princípio os CRs poderiam atuar em qualquer banda de frequência, porém, conforme o decorrer do tempo, foram sendo identificadas algumas bandas de frequência favoritas para seu uso. Uma delas é a banda dos serviços de radiodifusão de Televisão, onde os espaços livres são chamados de TV White Spaces.

2.4. TV White Space

Na transição dos sistemas de TV analógico para a TV digital, a faixa de 700 MHz (desde 698 MHz até 806 MHz), que correspondiam aos canais 52 a 69, foi liberada para ser usada por outros sistemas de comunicação, como o sistema celular de quarta geração 4G, ilustrado na Figura 8.



Fonte: Do Autor

Mas, mesmo com a liberação da faixa de 700MHz, a banda do sistema de TV Digital (canais 14 – 51) não está sendo utilizada o tempo todo, existindo ainda canais livres de transmissão dentro dessa banda.

Os intervalos de frequências que não são utilizados temporalmente pelos usuários licenciados são chamados de White Space.-Por outro lado, o termo TV White Space (TVWS) refere-se a canais de televisão não utilizados temporalmente, como mostrado na Figura 9. Os dispositivos oportunistas destinados a operar nas faixas de TVWS são chamados de *White Space Devices* (WSD).

Figura 9 – TV White Spaces

Canais de TV Digital - 470 a 698 MHz



🔆 Canal de TV ocupado 🛛 🔄 canal livre

canal livre (TV White space)

Fonte: Do Autor

TVWS tornou-se atraente devido à sua largura de banda e cobertura. As suas propriedades de propagação permitem facilmente acesso dentro de prédios [22]. Assim, a FCC permitiu o uso oportunista de TVWS mediante relatórios em 2004 e 2008. Mas, para prevenir interferências, exigiu que os dispositivos que fossem a usar TVWS sejam capazes de detectar sinais até -114dBm dos usuários licenciados. Em caso de um dispositivo que esteja usando um canal livre de TV, um controle de potência é requerido para proteger aos canais de TV adjacentes ocupados pelos usuários licenciados.

Assim, entidades do setor das telecomunicações desenvolveram algumas normas e padrões que permitam utilizar a banda de TVWS sem causar interferência com serviços licenciados.

2.4.1. Regulação e Padronização

Para auxiliar e facilitar o desenvolvimento e a implantação da tecnologia de CR, algumas normas foram feitas pelos organismos ITU, IEEE, ETSI e ECMA. Essas normas consideram, principalmente, o aumento na eficiência do uso do espectro eletromagnético usando a banda de TVWS.

Atualmente, dentre as principais normas tem-se a IEEE 802.22, que é a primeira norma baseada em tecnologia de CR [59]. Ela é uma norma para redes sem fio de área regional (*WRAN, Wireless Regional Access Network*) nas faixas UHF/VHF de televisão, entre 54MHz e 862MHz. O grupo do IEEE 802.22 foi formado em 2004. Nas normas, especifica-se os seguintes limiares para desocupar um canal quando se observa a presença dos seguintes sinais [50].

- Televisão digital: -116 dBm sobre um canal de 6 MHz.
- Televisão Analógica (NTSC): -94 dBm no pico da portadora.
- Microfones sem fio: -107 dBm em uma largura de banda de 200 kHz.

O protocolo 802.22 considera a utilização de tabelas de ocupação do espectro para diminuir a interferência sobre os usuários primários. Além disso, a norma estabelece limites para a potência máxima de transmissão e interferência em faixas adjacentes.

Além desse protocolo, outros padrões foram criados na indústria, dentre deles temos: IEEE 802.11af [60], ECMA 392 [61], ETSI RRS [62], a Tabela 2 mostra alguns esforços de padronização [63]:

	Tabela 2 - Resumo de iniciativas de padronização											
Organização	Padrão	Caraterísticas										
ETSI	ETSI	Especifica a viabilidade de atividades de padronização relacionadas a sistemas de rádio reconfiguráveis										
CogNeA	ECMA-392	Especifica uma camada MAC e PHY para redes sem fio cognitivas pessoais/portáteis operando na banda de TVWS.										
IEEE	802.22	Especifica o uso da banda de TVWS para sistemas de rede sem fio em área rural.										
	802.11af	sistemas de redes locais sem fio (WLAN).										
	802.11k	Especifica meios para medir, estimar e identificar características do uso do espectro.										

802.15.4M	Especifica taxas baixa	tecnolo is.	ogias hab	ilitadoras	de TVWS p	ara
SCC41	Especifica	padrõ	es gerai	s sobre	gerenciame	nto
	avançado	do	espectro	o para	estimular	0
	desenvolvir	mento	de CRs.			

Fonte : [63]

2.4.2. Aplicações de TVWS

O conceito de TVWS está sendo investigado pela academia, indústrias e governos como um candidato ideal para solucionar a crescente demanda por espectro eletromagnético. Existem muitas aplicações onde a banda de TVWS pode ser utilizada. Uma das mais exploradas é o uso dessa banda como frequência de operação para WRAN (*Wireless Regional Access Network*), para prover acesso de banda larga em ambientes rurais.

Por outro lado, a utilização em tecnologia M2M (*Machine to Machine*) também é proposta, onde, dispositivos cognitivos utilizando a banda de TVWS, se comunicam entre si diretamente (*peer to peer*), sem utilizar uma estação base intermediária.

A utilização em pontos de acesso de curto alcance, como por exemplo femtocélulas e WLAN também está sendo estudado, além da utilização em sistemas de sensores e aplicações de IoT.

Em [63] há uma classificação de algumas potenciais aplicações de TVWS que estão sendo pesquisadas atualmente:

- Acesso sem fio de banda larga em ambientes rurais;
- Futuras redes domésticas sem fio/redes de femtocélulas;
- Serviços sem fio celular-WLAN sem emendas;
- Redes Smart grid e smart meter;
- Sistemas de localização em interiores.

Na Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2015, a ITU decidiu realocar a banda de 700 MHz (694-790 MHz) para serviços IMT (*International Mobile Telecommunications*). IMT é o termo genérico utilizado pela ITU para sistemas móveis de banda larga. Ademais, colocou a discussão a utilização futura da banda de TV (470-694 MHz) até 2025 [64], uma vez que estudos demostraram um baixo tempo de ocupação na banda de TV digital [65]. Finalmente, o ECC (*Electronic Communications Committee*) [66] considera alguns cenários de utilização futura para a faixa 470-694 MHz [13], entre eles; a utilização da faixa para o serviço de TV existente; a utilização híbrida para o serviço de TV/LTE *downlink*; a utilização híbrida para o serviço de TV/LTE incluindo o *uplink*; e tecnologias futuras de comunicação.

2.5. Compatibilidade de Femtocélulas Cognitivas 5G em TVWS

Segundo estudos feitos ao longo do tempo [3], [4], [5], a maior parte do tráfego celular está vindo desde ambientes interiores, e com uma tendencia a crescer mais rápido que o trafego que vem desde ambientes exteriores. Além disso, analises [6], [7], mostraram que no início da implantação de redes 5G, 96% dos dados iriam ser consumidos desde locais interiores. Isso está motivando à utilização de femtocélulas para solucionar a demanda de taxa de dados mais alta e também melhorar a cobertura em ambientes interiores.

Atualmente as femtocélulas operam nas mesmas frequências que as redes macrocelulares, comumente em GHz. Não obstante, sinais em altas frequências não conseguem penetrar com facilidade construções, tornando a QoS baixa em ambientes interiores [16]. Nessa situação, para melhorar a conectividade, os dispositivos que estão em ambientes interiores devem transmitir com uma potência maior, o que pode causar interferência incomum [67].

Em [68], um esquema de alocação de recursos utilizando TVWS para redes de femtocélulas LTE foi comparado com o esquema de alocação tradicional de recursos onde todos os espectros são compartilhados pelas macrocélulas e femtocélulas. Nesse estudo, femtocélulas identificadas como potenciais interferentes foram alocadas na banda de TVWS em vez da mesma banda de frequência que as macrocélulas. Os resultados mostraram que com o esquema de alocação utilizando TVWS há cerca de 50% de redução da interferência *cross-tier*, conforme Figura 10, onde o eixo vertical indica a interferência sofrida pelos usuários das macrocélulas, e o eixo horizontal é o número de rodadas de simulação.





Fonte: [68]

Assim, foi mostrado o potencial da banda de TVWS para resolver o problema de interferência em HetNets. A proposta da mudança da banda de operação do sistema femtocelular para a banda de TVWS soluciona o problema de interferência com a rede macrocelular, no entanto, estas femtocélulas cognitivas devem ser capazes de coexistir com o sistema de TV, conformando um novo cenário de estudo.

Este novo cenário está composto pela coexistência dos serviços de transmissão de TV (usuários licenciados), e uma rede de femtocélulas (usuários oportunistas) operando na banda de TVWS. A Figura 11 mostra o cenário do sistema proposto, onde as estações de TV transmitem normalmente em seus canais licenciados, e as femtocélulas ocupam os canais de TV temporalmente livres (TVWS). Porém, femtocélulas operando na banda de TVWS podem causar interferências (co-canal e adjacente) nos canais licenciados de TV.

Embora os sistemas de TV possam estar protegidos contra interferências indesejadas, eles, devido a sua alta potência de transmissão, também podem introduzir interferências significativas no sistema femtocelular que opera em TVWS. Assim, estudos de coexistência entre esses dois sistemas é necessário.



Figura 11 – Femtocélulas operando em TVWS

Fonte: Do Autor

Segundo o padrão 3GPP TS 38.104 [26], as faixas de frequência em que o sistema 5G NR pode operar estão divididas em dois grupos de frequências, FR1 e FR2, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 5 - Delillição de l	alkas de llequelicia para 50
Designação de faixa de	Faixa de frequência
frequência	correspondente
FR1	410 MHz – 7125 MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz

ição do foixos do fraguê

A banda de TVWS (470 MHz – 698 MHz) se encontra na faixa de frequência FR1, o que representa uma oportunidade de utilização.

A relação entre a largura de banda do canal, a banda de guarda e a configuração da largura de banda de transmissão para o sistema 5G NR é mostrada na Figura 12, onde a banda de guarda pode ser assimétrica.



Figura 12 – Definição da largura de banda e sua configuração para um canal 5G NR

Fonte: [26]

A configuração da largura de banda de transmissão para cada canal da estação base (BS - Base Station) na faixa de frequências FR1 está especificada na Tabela 4, onde SCS é o espaçamento da subportadora (Subcarrier Spacing) e NRB é o número de blocos de recurso (Resource Blocks).

	l'abela 4 – Configuração da largura de banda de transmissão da BS em FR1												
SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	Nrb	Nrb	Nrb	Nrb	Nrb	NRB	Nrb	Nrb	Nrb	Nrb	Nrb	Nrb	Nrb
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Fonte: [26]

A Tabela 5 mostra a configuração da largura de banda para o equipamento do usuário (*UE – User Equipment*).

SCS	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
(KEZ)	N _{RB}	NRB	N _{RB}	Nrb								
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	217	245	273

38

51

65

79

Tabela 5 - Configuração da largura de banda máxima da transmissão do UE

Fonte: [27]

N/A

11

18

24

31

60

Ambas as configurações (BS e UE) são compatíveis com a largura de banda de 6 MHz de um canal de TV do padrão ISDB-TB. Em um canal livre de TV pode ser alocado um sistema 5G NR de largura de banda de 5 MHz, porém, dependendo do

121

135

107

número de canais de TVWS adjacentes, poderiam ser alocados sistemas 5G NR de largura de bandas maiores (10 MHz, 15 MHz, 20 MHz, etc.).

O sistema 5G NR também prevê as bandas de guarda mínimas necessárias na faixa FR1 para a BS e UE, especificadas na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente. Esses requisitos são compatíveis com o sistema de TV.

	i abela o – Danua de guarda minima para uma 65 em FRT												
SCS	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
(kHz)	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
15	242.5	312.5	382.5	452.5	522.5	592.5	552.5	692.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	505	665	645	805	785	945	905	1045	825	965	925	885	845
60	N/A	1010	990	1330	1310	1290	1610	1570	1530	1490	1450	1410	1370

	Tabela 6 – Band	a de	quarda	mínima	para	uma	BS	em	FR1
--	-----------------	------	--------	--------	------	-----	----	----	-----

Fonte: [26]

Tabela 7 – Banda de guarda mínima para um UE em FR1

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
15	242.5	312.5	382.5	452.5	522.5	592.5	552.5	692.5	N/A	N/A	N/A	N/A
30	505	665	645	805	785	945	905	1045	825	925	885	845
60	N/A	1010	990	1330	1310	1290	1610	1570	1530	1450	1410	1370

Fonte: [27]

Por outro lado, a faixa de frequência de TV na banda UHF é um pouco mais baixa que as frequências utilizadas nos sistemas celulares. Sendo a frequência mais baixa, tem-se um baixo custo no projeto, além da baixa potência, em comparação com frequências mais altas. Além disso, o comprimento da onda é suficientemente curto para a construção de antenas com um tamanho aceitável para aplicações de uso portátil [69].

Ademais, a baixa frequência da banda de TV permite que os sinais possam atravessar paredes e outros obstáculos mais facilmente que sinais de frequências maiores, o que pode ser uma vantagem para o funcionamento de femtocélulas em ambientes interiores.

Sendo os requisitos do 5G NR compatíveis com os canais de TVWS, então por que não propor um sistema femtocelular cognitivo operando em TVWS?

2.5.1. Trabalhos relacionados

Alguns trabalhos específicos para a utilização da banda de TVWS em femtocélulas foram feitos.

Em [48] é usado um banco de dados que obtém as informações de espectro disponíveis localmente e que permite um esquema de alocação de recursos para mitigar a interferência. No entanto, esta solução mostra-se lenta, com manutenção dos dados ineficaz em cenários interiores.

Em [70], a capacidade de uma rede de femtocélulas é explorada usando o espectro TVWS. Outro aspecto importante analisado é a interferência entre usuários da rede heterogênea. As femtocélulas podem causar interferência nos receptores de TV e em outros sistemas que utilizam o espectro TVWS. Em [70] é apresentada uma análise dessa interferência, fazendo uma classificação dos diferentes cenários em que essas interferências podem ocorrer.

Em [71], um sistema femtocelular cognitivo operando em TVWS para redes LTE foi estudado, para um edifício residencial típico. Por meio de simulações foi demostrado que uma femtocélula cognitiva LTE pode fornecer uma cobertura interna excelente. Neste estudo, dois esquemas de antenas que evitam interferências foram propostos e comparados.

Em [65] a máxima EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) permitida é estudada para uma femtocélula LTE-A operando no TVWS quando o padrão do sistema de TV é DVB-T2, o estudo foi realizado em condições de laboratório e validado por algumas medições de campo.

Alguns estudos sobre o uso de banco de dados para o sistema femtocelular usando o espectro TVWS também foram apresentados em [48] e [72].

Além desses trabalhos, a eficiência energética de femtocélulas operando no TVWS também foi estudada em [13] e [73].

No entanto, além da falta de estudos de compatibilidade de femtocélulas cognitivas operando em TVWS, casos de estudos de femtocélulas com tecnologia 5G são escassos na literatura.

2.5.2. Desafios das Femtocélulas operando em TVWS

Para conseguir utilizar a banda de TVWS em femtocélulas, alguns desafios devem ser pesquisados: Obtenção de informações sobre o espectro do TVWS em ambientes interiores:

- Utilização da tecnologia CR em femtocélulas, especialmente o sensoriamento espectral;
- Detecção espectral apropriada para o espectro de TV em ambientes interiores;
- Utilização de banco de dados para o processo cognitivo.

Alocação de recursos de TVWS em femtocélulas:

- Estudos de integração de femtocélulas com o núcleo da rede;
- Algoritmos para decidir a frequência de operação da femtocélula (telefone celular ou TVWS);
- Metodologias para coexistência entre femtocélulas e macrocélulas.

Desenvolvimento de algoritmos para a proteção do sistema de TV:

- Estudo de características de propagação em ambientes internos;
- Determinação das limitações das femtocélulas para evitar interferência no sistema de TV;
- Algoritmos para determinar a potência máxima permitida de transmissão das femtocélulas.

A coexistência de sistemas também apresenta desafios que devem ser considerados [48] [30] :

- Interferência dinâmica: vários usuários utilizando o mesmo espectro em diferentes tempos e espaços, considerando as condições de propagação e controlando sua potência de transmissão dinamicamente;
- Heterogeneidade: vários usuários com diferentes padrões operacionais utilizando o mesmo espectro de TVWS.

2.6. Conclusão

Ao longo deste capitulo foi estudado teoricamente todas as tecnologias envolvidas neste novo cenário. Foi analisado se a banda de TVWS poderia ser utilizada como banda de operação de femtocélulas 5G, usando rádios cognitivos.

Foi visto que, teoricamente, é possível alocar a banda de TVWS para femtocélulas cognitivas, e que essa mudança se encontra compatível com os padrões de 5G.

A faixa de um canal de TV (6MHz) seria suficiente para a operação de femtocélulas, pois a largura de banda mínima na tecnologia 5G NR é de 5 MHz. Além disso, dependendo do número de canais de TVWS adjacentes, poderiam ser implementados sistemas 5G NR de largura de bandas maiores.

Finalmente, para usar femtocélulas na banda de TVWS, precisa-se ainda estimar quanto espectro disponível existe na banda de TV em ambientes interiores e analisar a interferência causada no sistema de TV, tópicos tratados nos próximos capítulos.

Capítulo 3 Ocupação espectral da TV Digital em ambientes interiores

Um dos requisitos para que uma femtocélula possa funcionar na banda de TVWS é que existam canais de frequência sem uso. Segundo alguns estudos prévios, uma média de 150 MHz de espectro não está sendo utilizado na banda de TV.

Dado que a propagação em ambientes interiores depende da estrutura do local, é necessário realizar medições abrangentes da banda de TV para conhecer sua ocupação espectral. Analisando medições em diferentes locais, pode ser possível estimar a quantidade de espectro livre e especificar melhor áreas onde os canais de TVWS podem ser utilizados.

Assim, neste capítulo analisamos a ocupação espectral em um local da cidade de São Paulo, a fim de ter uma visão da ocupação da banda de TV em ambientes interiores.

3.1. Trabalhos anteriores

Em TV Digital, apenas o nível do sinal não é suficiente para determinar se existe transmissão ou não. Deve existir também uma boa relação portadora/ruído (*C/N – Carrier to Noise*). Segundo a norma ABNT NBR15604 [74], esta relação comumente chamada de qualidade do sinal, deve ser maior que 19dB.

Estudos sobre ocupação espectral da banda de TV foram feitos ao longo do tempo. Um estudo realizado na Europa considerando 11 países na faixa de 470 MHz a 790 MHz determinou que, na média de uma área geográfica, 56% dos canais de TV não estavam sendo utilizados [75].

No Reino Unido, [22] mostrou que em média existem 150 MHz de TVWS disponíveis para acesso por CRs de baixa potência, conforme a Figura 13. Por outro

lado, um outro estudo na Europa [76] estimou uma média de 125 MHz de espectro de TVWS disponível.





Fonte: [22]

Na Turquia, a disponibilidade do espectro de TVWS também foi pesquisado na faixa de 470 MHz a 790 MHz [77]. As medições foram realizadas em dez locais que estão distanciados de forma diferente das estações transmissoras de TV. Com base nas medições foi determinado 120 MHz de espectro disponível na banda de TV.

Em [78], apresenta-se uma análise do comportamento da propagação de dois canais de TV na banda UHF em ambientes interiores. Nesse trabalho foram feitas medições em diferentes andares e analisou-se a atenuação do sinal devido à influência das paredes, portas e janelas. Em todos os casos, observou-se que os resultados foram muito semelhantes. Embora a potência recebida varie com o tempo, essas variações são suficientemente pequenas para serem ignoradas, e pode-se afirmar que a potência do sinal recebido é altamente estável ao longo do tempo. No entanto, existe uma forte relação entre a intensidade do sinal recebido e a localização vertical no prédio.

3.2. Metodologia

A metodologia aplicada foi realizar medições do nível do sinal recebido em um ambiente interior localizado no segundo andar de um apartamento padrão em um prédio de cinco andares na cidade de São Paulo. As coordenadas do prédio são 23°31'17.8"S 46°42'36.7"W, conforme mostrado na Figura 14.





Fonte: Google Maps

Os dados coletados nos 37 canais (14 - 51) atualmente disponíveis para TV Digital na banda UHF foram analisados. O canal 37 não foi analisado pois é utilizado para serviços de radioastronomia. Além disso, a banda VHF da TV digital também não foi tomada em conta pois não é compatível com o sistema 5G NR.

Para as medições de ocupação dos canais de TV, foram utilizados um receptor convencional de TV Digital e um equipamento de SDR.

3.3. Medições de ocupação da banda de TV

A Figura 15 mostra o espectro de RF na banda de frequências em estudo (470MHz – 698MHz). O espectro foi coletado com um equipamento de SDR, conhecido como *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) B100.



Figura 15 – Espectro de RF de canais de TV em um ambiente interior em São Paulo

Fonte: Do Autor

Para este estudo, foram tomadas medidas de intensidade do sinal e qualidade do sinal dos canais digitais (14 - 51) em quatro horários: madrugada (02:00h), manhã (10:00h), tarde (15:00h) e noite (20:00h). Esses horários foram escolhidos pois em conjunto permitem obter uma visão do comportamento da ocupação espectral ao longo de um dia inteiro.

A Figura 16 mostra os canais UHF (14 - 51) e a intensidade de sinal. Por outro lado, a Figura 17 mostra a qualidade do sinal dos respectivos canais, ambas para o horário da madrugada (02:00h).



Figura 16 - Intensidade do sinal dos canais de TV digital na banda UHF

Fonte: Do Autor



Figura 17 – Qualidade do sinal dos canais de TV digital na banda UHF

Fonte: Do Autor

A Tabela 8 mostra o resumo das medições para os quatro horários, madrugada (02:00h), manhã (10:00h), tarde (15:00h) e noite (20:00h).

Canal	Intensidade do sinal (%)			l (%)	Qua	alidade	do sinal	(%)	Ocupado?			
Canar	02:00h	10:00h	15:00h	20:00h	02:00h	10:00h	15:00h	20:00h	02:00h	10:00h	15:00h	20:00h
14	30	30	30	30	90	50	50	90	Sim	Sim	Sim	Sim
15	25	25	25	25	25	25	25	25	Sim	Sim	Sim	Sim
16	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
17	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
18	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
19	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
20	25	25	25	25	25	32	32	25	Não	Não	Não	Não
21	15	20	20	15	32	25	25	32	Sim	Sim	Sim	Sim
22	30	30	30	30	25	90	90	25	Sim	Sim	Sim	Sim
23	30	30	30	30	90	90	90	90	Sim	Sim	Sim	Sim
24	48	46	48	48	90	90	90	90	Sim	Sim	Sim	Sim
25	20	20	20	20	54	90	90	54	Sim	Sim	Sim	Sim
26	30	30	30	30	90	90	90	90	Sim	Sim	Sim	Sim
27	13	13	13	13	90	90	90	90	Sim	Sim	Sim	Sim
28	40	42	42	40	54	90	54	54	Sim	Sim	Sim	Sim
29	44	44	44	44	90	90	90	90	Sim	Sim	Sim	Sim
30	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
31	15	15	15	15	54	90	54	54	Sim	Sim	Sim	Sim
32	0	0	0	0	25	25	25	25	Não	Não	Não	Não
33	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
34	0	0	0	0	38	90	90	38	Sim	Sim	Sim	Sim
35	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não

Tabela 8 – Ocupação da Banda UHF da TV em quatro horários

36	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
38	0	0	0	0	25	25	25	25	Não	Não	Não	Não
39	0	0	0	0	25	25	25	25	Sim	Sim	Sim	Sim
40	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
41	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
42	20	15	15	20	54	90	54	54	Sim	Sim	Sim	Sim
43	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
44	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
45	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
46	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
47	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
48	9	0	0	9	25	25	32	25	Sim	Sim	Sim	Sim
49	0	0	0	0	39	0	0	39	Não	Não	Não	Não
50	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não
51	0	0	0	0	0	0	0	0	Não	Não	Não	Não

Fonte: Do Autor

Percebe-se que nos quatro horários, dos 37 canais observados, somente 16 estavam ocupados, e 21 estavam livres ou a intensidade dos sinais não foi suficiente para o receptor recuperar a transmissão. Esses 21 canais fazem um total de 126 MHz e podem ser considerados como TVWS.

Observa-se que a Intensidade e a qualidade do sinal na maioria dos canais são iguais. Embora em alguns canais a intensidade e qualidade tenha pequenas variações ao longo do tempo, isto não mudou o estado ocupado/livre do canal.

Além disso, observa-se que os canais ocupados e livres são sempre os mesmos nos quatro horários, o que mostra que o espectro da banda de TV é altamente estável ao longo do tempo.

3.4. Conclusão

Foram considerados diversos horários para realizar a observação da ocupação do espectro. Em todos os horários e na mesma localização em ambiente interior, foi notado que existe 126 MHz de espectro desocupado, o que confirma estudos anteriores.

Porém, ainda são necessários estudos experimentais adicionais sobre o comportamento do espectro da banda de TV em ambientes interiores. Pode ser feito um estudo de comparação entre a ocupação espectral em um ambiente interior e um ambiente exterior nas mesmas coordenadas. Além disso, podem ser feitos mais estudos de estabilidade do espectro ao longo do tempo e considerando um universo de amostras maior. Esses estudos permitirão conhecer melhor a banda de TV e beneficiarão a implantação de femtocélulas cognitivas.

Neste capítulo obtivemos uma visão da ocupação do espectro da banda de TV e confirmamos estudos anteriores sobre a disponibilidade de TVWS. No próximo capítulo será feito análises de interferência caso uma femtocélula cognitiva fosse alocada nos canais de TVWS.

Capítulo 4 Análise de Interferência com o sistema de TV

Nos capítulos anteriores foi estudado teoricamente a possível utilização da banda de TVWS em femtocélulas cognitivas 5G. Além disso, foi confirmado que existe espectro na banda de TV que não está sendo utilizado, e que esse espectro é maior em ambientes interiores comparado com ambientes exteriores. No entanto, sistemas femtocelulares operando em TVWS devem coexistir com o sistema licenciado de TV, e para que isso seja possível, não deve existir interferências entre os dois sistemas.

A interferência dos sistemas celulares nos receptores de TV Digital produziria interrupções na recepção e, por conseguinte, reduziria a cobertura do sistema de TV Digital. Por outro lado, a interferência dos transmissores da TV Digital em sistemas celulares, afetaria a relação SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) abaixando a qualidade do Serviço (*QoS- Quality of Service*) dos usuários do sistema celular [79].

Dessa forma é necessário realizar análises de interferência para determinar a coexistência desses dois sistemas e protegê-los.

Neste capítulo apresentamos resultados obtidos com simulações computacionais da interferência entre femtocélulas 5G operando em TVWS e a TV Digital em diferentes cenários. Para isso utilizamos a ferramenta SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*), na versão 5.4.1, que está baseada no método de Monte Carlo; esta ferramenta permite encontrar a probabilidade de interferência em relação a alguns parâmetros, entre eles a distância de separação dos sistemas envolvidos.

Para este estudo foram utilizados o padrão do sistema celular 5G para as femtocélulas e o padrão ISDB-TB para o sistema de TV digital. O padrão 5G foi utilizado por ser a tecnologia atual em sistemas celulares. O padrão ISDB-TB foi

utilizado por ser a tecnologia atual para sistemas de TV digital no Brasil e na maioria de países da américa latina.

A probabilidade de interferência do sistema femtocelular nos receptores de TV foi avaliada utilizando a relação portadora/interferência C/I (*carrier-to-interference ratio*); por outro lado, a avaliação de interferência da TV Digital no sistema femtocelular foi feita medindo a perda da capacidade da rede, ou seja, a taxa bits por usuário.

A análise se concentrou em três frequências intermediárias de operação; 479,142856 MHz (Canal 15); 581,142856 MHz (Canal 32); e 677,142856 MHz (Canal 48). Essas frequências foram escolhidas pois permitem generalizar a banda UHF completa do sistema de TV Digital no Brasil. Neste estudo, foram analisadas tanto a interferência co-canal como a interferência de canal adjacente, para larguras de banda de 5MHz e 10MHz.

A partir dos resultados será possível estabelecer limites e requisitos para a coexistência destes dois sistemas, além de normas que permitam evitar as possíveis interferências.

4.1. Estado da Arte

No Brasil, quando a banda de 700 MHz (698MHz - 806MHz) foi liberada e destinada para o sistema celular 4G LTE, houve a necessidade de saber se o sistema macrocelular LTE adjacente à banda da TV digital (470 MHz – 698 MHz) causaria algum tipo de interferência, especialmente nos canais 49, 50 e 51 (680 MHz – 698 MHz).

Para isso, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) avaliou experimentalmente a interferência do LTE 700 MHz em 5 tipos de receptores de TV digital. Os resultados mostraram que nas condições testadas existia interferência, porém, usando-se certos filtros a interferência no LTE *downlink* podia ser resolvida. No entanto, no *uplink* esses filtros não foram suficientes para proteger de interferências a recepção da TV digital [80], o que foi confirmado por outros estudos teóricos e experimentais. Esses estudos foram feitos considerando uma macrocélula operando com alta potência e com distâncias maiores a 1Km.

Por outro lado, o cenário proposto neste trabalho é diferente. Trabalhos na literatura sobre a interferência mútua entre femtocélulas operando em TVWS e o sistema de TV são escassos. Este cenário presenta caraterísticas como femtocélulas de baixas potências (menos de 20dBm) e curto alcance (até 40 metros).

4.2. Caracterização do canal

No Brasil, as bandas destinadas para o uso de radiodifusão de televisão encontram-se nas faixas de VHF e UHF, como mostrado na Tabela 9.

Banda	Sigla	Faixa UIT	Frequência	Canais									
Frequência Muito Alta	VHF	8	54 – 72 MHz	2 - 4									
Frequência Muito Alta	VHF	8	76 – 88 MHz	5 - 6									
Frequência Muito Alta	VHF	8	174 – 216 MHz	7 - 13									
Frequência Ultra Alta	UHF	9	470 – 608 MHz	14 – 36									
Frequência Ultra Alta	UHF	9	614 – 806 MHz	38 – 69									

Tabela 9 – Bandas para a radiodifusão do sistema de TV

Fonte: [56]

Após do apagão analógico, a faixa de UHF 470 a 698 MHz foi alocada para serviços de TV Digital, com exceção da faixa de 608 a 614MHz (Canal 37) que é usado para serviços de radioastronomia. Na Tabela 10 e Tabela 11 se apresenta a canalização para a TV Digital de acordo com resolução da Anatel [81].

Canal	Frequências Extremas (MHz)	Frequência da portadora central do sinal (MHz)
7	174 – 180	177 + 1/7
8	180 – 186	183 + 1/7
9	186 – 192	189 + 1/7
10	192 – 198	195 + 1/7
11	198 – 204	201 + 1/7
12	204 – 210	207 + 1/7
13	210 – 216	213 + 1/7

Tabela 10 - Canalização para TV Digital na Faixa de VHF

Fonte: [82]

Canal	Frequências Extremas (MHz)	Frequência da portadora central do sinal (MHz)
14	470 – 476	473 + 1/7
15	476 – 482	479 + 1/7
16	482 – 488	485 + 1/7
17	488 – 494	491 + 1/7
18	494 – 500	497 + 1/7

Tabela 11 - Canalização para TV Digital na Faixa de UHF

19	500 – 506	503 + 1/7
20	506 – 512	509 + 1/7
21	512 – 518	515 + 1/7
22	518 – 524	521 + 1/7
23	524 – 530	527 + 1/7
24	530 – 536	533 + 1/7
25	536 – 542	539 + 1/7
26	542 – 548	545 + 1/7
27	548 – 554	551 + 1/7
28	554 – 560	557 + 1/7
29	560 – 566	563 + 1/7
30	566 – 572	569 + 1/7
31	572 – 578	575 + 1/7
32	578 – 584	581 + 1/7
33	584 – 590	587 + 1/7
34	590 – 596	593 + 1/7
35	596 – 602	599 + 1/7
36	602 – 608	605 + 1/7
37	Não usado para TV	Não usado para TV
38	614 – 620	617 + 1/7
39	620 – 626	623 + 1/7
40	626 – 632	629 + 1/7
41	632 – 638	635 + 1/7
42	638 – 644	641 + 1/7
43	644 – 650	647 + 1/7
44	650 – 656	653 + 1/7
45	656 – 662	659 + 1/7
46	662 – 668	665 + 1/7
47	668 – 674	671 + 1/7
48	674 – 680	677 + 1/7
49	680 - 686	683 + 1/7
50	686 – 692	689 + 1/7
51	692 – 698	695 + 1/7

Fonte: [82]

Cada canal de TV digital tem uma largura de banda de 6 MHz, padrão M, segundo a ITU. O número de canais disponíveis para TV no Brasil é 12 na banda VHF e 37 na banda UHF, sendo um total de 49 canais ocupando 294 MHz do espectro eletromagnético. Esses canais estão distribuídos pelo território nacional segundo regras da ANATEL, e leva em conta a localização da estação transmissora, a altura da antena, a potência, a classe do serviço, a área de cobertura, e a morfologia do terreno. A Tabela 12 mostra as relações de proteção dos canais de TV para canais interferentes, em co-canal e canal adjacente.

		Canal desejado = N		
Canal interferente	Digital sobre	Analógico sobre	Digital sobre	
	Analógico	Digital	Digital	
N (co-canal)	+34	+7	+19	
N-1(adjacente inferior)	-11	-26	-24	
N+1(adjacente superior)	-11	-26	-24	

Tabela 12 - Relações de Proteção (dB) para Canais em VHF e UHF

Fonte: [81]

4.2.1. Padrão ISDB-TB

Atualmente há vários padrões para TV digital terrestre: ATSC (*Advanced Television System Committee*), desenvolvido pelos Estados Unidos; DVB-T, desenvolvido pela Europa; ISDB-T (*Integrated Services for Digital Broadcasting Terrestrial*), desenvolvido pelo Japão e; ISDB-TB, modificação Brasileira do padrão Japonês, que foi escolhido pela maioria de países da américa latina.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) disponibilizou a norma para o sistema ISDB-TB denominada NBR15601 [82], que foi elaborada pela Comissão de Estudo Especial de Televisão Digital (ABNT/CEE-00:001.85). Nessa norma, cada canal de TV Digital ocupa 6 MHz sendo 5,7MHz a largura de banda para transmissão e o restante para separação com os canais adjacentes.

O espectro de 6 MHz está dividido em 14 partes das quais utiliza-se 13 segmentos OFDM para a transmissão, cada um com largura de banda de 428,572 KHz, (6 MHz/14) [83]. O arranjo do segmento OFDM é feito de acordo com a Figura 18, onde o segmento número 0 deve obrigatoriamente ser posicionado no centro da banda e os segmentos sucessivos colocados alternativamente acima e abaixo desse segmento.





Fonte: Do Autor

O sistema permite diferentes combinações, podendo-se transmitir até três tipos de serviços, como mostrado na Figura 19:

- HDTV (*High-Definition Television*), televisão de alta definição que utiliza 9 segmentos e que tem uma modulação 64-QAM para receptores fixos;
- SDTV (*Standard-Definition Television*), televisão de definição padrão que utiliza 3 segmentos com modulação 16-QAM para receptores fixos SD e receptores móveis;
- LDTV (Low Definition Television), televisão de baixa definição que utiliza 1 segmento com modulação QPSK para receptores portáteis.





Fonte: Do Autor

A Tabela 13 apresenta as características de transmissão da TV Digital no Padrão ISDB-TB.

	Parâmetros	Valores
1	Número de segmentos	13
2	Largura do segmento	6 000/14 = 428,57 kHz
3	Banda ocupada	5,575 MHz (modo 1)
		5,573 MHz (modo 2)
		5,572 MHz (modo 3)
4	Número de portadoras	1 405 (modo 1)
		2 809 (modo 2)
		5 617 (modo 3)
5	Tipo de modulação	DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Tabela	13 -	Parâmetros	do	sistema	de	transmissão	de	тν	1
ιανεία	10 -	i arametros	uu	Sistema	ue	liansinissau	ue		

6	Duração dos símbolos ativos	252 μs (modo 1)
		504 μs (modo 2)
		1008 μs (modo 3)
7	Espaçamento de portadoras	Bws/108 = 3,968 kHz (modo 1)
		Bws/216 = 1,984 kHz (modo 2)
		Bws/432 = 0,992 kHz (modo 3)
8	Duração do intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 da duração do símbolo ativos
		63; 31,5; 15,75; 7,875 μs (modo 1)
		126; 63; 31,5; 15,75 μs (modo 2)
		252; 126; 63; 31,5 μs (modo 3)
9	Duração total dos símbolos	315; 283,5; 267,75; 259,875 μs (modo 1)
		628; 565; 533,5; 517,75 μs (modo 2)
		1 260; 1 134; 1 071; 1 039,5 μs (modo 3)
10	Duração do quadro de transmissão	204 símbolos OFDM
11	Codificação de canal	Código convolucional, taxa = 1/2 com 64 estados
		Puncionado para as taxas 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
12	Entrelaçamento interno	Entrelaçamento intra e intersegmentos
		(entrelaçamento em frequência)
		Entrelaçamento convolucional com profundidade
		de interleaving
		0; 380; 760; 1.520 símbolos (modo 1)
		0; 190; 380; 760 símbolos (modo 2),
		0: 95: 190: 380 símbolos (modo 3)

Fonte: [82]

4.2.2. Classificação das Estações de TV

A FCC especificou máscaras espectrais para diferentes aplicações. Elas definem a potência de saída permitida segundo a frequência de operação. As estações de TV digital são classificadas em classes: classe especial, classe A, classe B e classe C. Os valores máximos de ERP (Effective radiated power), a altura de referência e as distâncias máximas do contorno protegido são mostrados na Tabela 14 e na Tabela 15. Segundo a Resolução N398 da ANATEL, cada classe está dividida em subclasses, sendo a diferença de potência entre as subclasses de 1dB.

Classe	Máxima Potência ERP	Altura Referência Acima do Nível Médio Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
Especial	16 kW (12 dBk)		65
A	1.6 kW (2 dBk)		48
В	0.16 kW (-8 dBk)	150	32
С	0.016 kW (-18 dBk)	-	20

Tabela 14 - Estações em função de características para a faixa de VHF

Fonte: [81]

Tabela 15 - Estações em função de características para a faixa de UHF

Classe	Canais UHF	Máxima Potência ERP	Altura Referência Acima do Nível Médio Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
	14 a 25	70 kW (18.5 dBk)		
Especial	26 a 46	80 kW (19 dBk)		57
	47 a 59	100 kW (20 dBk)		
Α	14 a 59	8 kW (9 dBk)	150	42
В	14 a 59	0.8 kW (-1 dBk)		29
C	14 a 59	0.08 kW (-11 dBk)	-	18

Fonte: [81]

4.3. Metodologia

O espectro eletromagnético pode ser usado de forma ideal se os sistemas de rádio alocados na mesma banda de frequência ou em bandas adjacentes garantem a compatibilidade sem causar interferência entre eles. Não existe um método perspicaz para evitar interferências em sistemas de rádios, a seleção cuidadosa das condições de compartilhamento é o único meio para obter uma coexistência bem-sucedida e um uso ideal do espectro [84]. Regras de coexistência podem ser obtidos por meio de métodos analíticos ou métodos estatísticos.

Neste trabalho, para encontrar a probabilidade de interferência entre os sistemas envolvidos, simulações foram feitas utilizando o software SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte-Carlo Analysis Tool*), ferramenta estatística baseada no método de Monte Carlo que foi desenvolvida pelo grupo de trabalho de engenharia de espectro da CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*).

4.3.1. SEAMCAT

SEAMCAT é um projeto de código aberto desenvolvido na linguagem Java. Permite calcular a interferência entre dois ou mais tecnologias de comunicação, em bandas adjacentes e em bandas co-canal. Neste simulador, são definidos dois tipos de sistemas, o sistema vítima e o sistema interferente. O sistema vítima é definido como o sistema que sofre a interferência (vítima de uma interferência), e o sistema interferente é quem produz a interferência no sistema vítima.

Para realizar as simulações, quatro conjuntos de parâmetros são necessários: parâmetros do transmissor do sistema vítima (*VLT - Victim Link Transmitter*); parâmetros do receptor do sistema vítima (*VLR - Victim Link Receiver*); parâmetros do transmissor do sistema interferente (*ILT - Interfering link transmitter*); e parâmetros do receptor do sistema interferente (*ILR- Interfering link receiver*). A Figura 20 mostra os elementos simulados em SEAMCAT, onde o receptor do sistema vítima recebe dois sinais: dRSS (*desired Received Signal Strength*), intensidade do sinal desejado; e iRSS (*interfering Received Signal Strength*), intensidade do sinal interferente.



Figura 20 – Elementos simulados em SEAMCAT.

Fonte: [85]

4.3.2. Método de Monte Carlo

O método de simulação de Monte Carlo é um método estatístico para simular processos. É baseado no princípio de coletar amostras de variáveis aleatórias de uma determinada distribuição. Os métodos de simulação estatística podem ser contrastados com os métodos analíticos convencionais, que normalmente são aplicados a equações diferenciais ordinárias ou parciais que descrevem algum sistema físico ou matemático subjacente.

Neste estudo, o método considera muitos eventos independentes no tempo, espaço e frequência. Para cada evento um cenário é construído usando várias variáveis aleatórias que definem a simulação; as distribuições destas variáveis precisam ser definidas para todos os parâmetros relevantes do sistema (alturas de antena, potências, frequências de operação, localização dos transceptores, etc.). Para cada evento, é calculado e armazenado a intensidade do sinal interferente e a intensidade do sinal desejado. Logo, a probabilidade de interferência pode ser calculada comparando os sinais desejados e indesejados no receptor do sistema vítima para cada evento usando critérios de interferência. Tendo um número suficiente de testes, a probabilidade de um certo evento ocorrer pode ser avaliada com precisão.

4.3.3. Critérios de Interferência

SEAMCAT utiliza quatro critérios para analisar a existência de interferência.

- C/I : Carrier to interference ratio;
- C/(I+N) : Carrier to interference plus noise ratio;
- (N+I)/N : Desensitisation;
- I/N : Interference to noise ratio.

A relação C/I pode ser calculado a partir das grandezas dRSS e iRSS. Existirá interferência se a relação C/I do receptor vítima for menor que o valor suportado por ele. A Figura 21 mostra os níveis utilizados para determinar se há interferência ou não.



Na Figura 21 (a) mostra-se a composição dos níveis de um sinal desejado dRSS recebido pela vítima em ausência de interferência. Na Figura 21 (b) mostra-se como é o princípio para calcular a relação C/I entre o sinal desejado dRSS e o sinal interferente iRSS.

Para que o sistema vítima suporte a interferência, a relação C/I deve ser maior que um critério pré-estabelecido. Se a relação C/I calculada é menor que o critério pré-estabelecido, considera-se que existe interferência no evento.

A condição do C/I é verificada para N eventos aleatórios. Finalmente se calcula a probabilidade de interferência (PI), que é dada por.

 $PI = 1 - (N_{bons \, eventos} - N_{total})$

As emissões dRSS e iRSS são calculadas de acordo a:

$$dRSS = P_{TXV} + G_{TXV} + G_{RXV} - PL_{TXV-RXV}$$
$$iRSS = P_{TXI} + G_{TXI} + G_{RXV} - PL_{TXI-RXV}$$

onde:

P _{TXV}	: potência do transmissor do sistema vítima;
G _{TXV}	: ganho da antena transmissora do sistema vítima;
G _{RXV}	: ganho da antena receptora do sistema vítima;
PL _{TXV-RXV}	: perda por propagação entre o transmissor e receptor vítima;
P _{TXI}	: potência do transmissor do sistema interferente;
G _{TXI}	: ganho da antena transmissora do sistema interferente;
PL _{TXI-RXV}	: perda por propagação entre o transmissor interferente e receptor vítima.

4.3.4. Máscaras espectrais

Máscaras espectrais são usadas no software para avaliar emissões excedentes que podem ou não interferir em outros sistemas. A máscara de emissão espectral (*SEM* - *Spectrum Emission Mask*) é uma medida relativa das emissões fora de faixa (*OOB* – *Out of Band*) em relação à potência dentro da banda (*in-band*). A Figura 22 mostra a máscara espectral do sistema interferente adjacente à máscara espectral do sistema vítima.



Fonte: [86]

4.4. Parâmetros de simulação

Para obter resultados confiáveis foram consideradas 20000 eventos nas simulações, conforme sugerido pelo manual de SEAMCAT. Além disso, para realizar as simulações de interferência foram utilizadas as especificações técnicas dos padrões dos sistemas envolvidos, padrão celular IMT-2020 e padrão de TV digital ISDB-TB.

4.4.1. Parâmetros do sistema de TV

Nas seções a seguir, são fornecidas caraterísticas técnicas e operacionais dos transmissores e receptores do sistema de TV. Foi utilizado o padrão ISDB-TB baseado nas normas Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

a. Transmissor de TV

Os parâmetros detalhados na Tabela 16 foram utilizados para as simulações, que estão de acordo com o padrão de transmissão ABNT15601 [82] e características de equipamentos comerciais:

Frequências intermedias de operação [MHz]:	479,142856 (Canal 15)
Frequencias intermedias de operação [Mi iz].	581,142856 (Canal 32)
	677,142856 (Canal 48)
Altura da antena transmissora [m]:	150
Ganho da antena transmissora [dBi]	12
Largura de banda [MHz]	6

Tabela 16 - Sistema Transmissor de TV - padrão ISDB-TB

Modelo de propagação	ITU-R P.1546-6
Desvio padrão do modelo de propagação [dB]	5,5
Antena	Omnidirecional

Fonte: Do autor

Para a potência de transmissão foram usados os valores máximos das classes de estações A e B. Na classe A, a máxima potência ERP é 8 kW (9dBk ou 69dBm) com um contorno protegido de 42 Km, por outro lado, na classe B, a máxima potência ERP é 0.8 kW com um contorno protegido de 29 Km.

As máscaras espectrais utilizadas na radiodifusão de TV digital pelo padrão ISDB-TB, segundo a recomendação da ABNT NBR 15601 estão especificadas na Tabela 17, onde se indicam as atenuações mínimas das emissões fora da faixa em relação à potência média do transmissor. Na Figura 23 essas máscaras são mostradas. No padrão ISDB-TB há três tipos de máscaras espectrais: Não-crítica, subcrítica e crítica; elas são escolhidas dependendo da classe do sistema de TV, a localização do transmissor e o tipo de sistemas que se encontram ocupando as bandas adjacentes.

Separação ou afastamento em relação	Atenuação mínima em relação à potência média, medida na frequência da portadora central		
à portadora central do sinal digital MHz	Máscara não crítica (dB)	Máscara subcrítica (dB)	Máscara crítica (dB)
-15	83,0	90,0	97,0
-9	83,0	90,0	97,0
-4,5	53,0	60,0	67,0
-3,15	36,0	43,0	50,0
-3,00	27,0	34,0	34,0
-2,86	20,0	20,0	20,0
-2,79	0,0	0,0	0,0
2,79	0,0	0,0	0,0
2,86	20,0	20,0	20,0
3,00	27,0	34,0	34,0
3,15	36,0	43,0	50,0
4,5	53,0	60,0	67,0
9	83,0	90,0	97,0
15	83,0	90,0	97,0

Tabela 17 - Especificação das máscaras do espectro de TV padrão ISDB-TB



Figura 23 – Máscara do espectro de transmissão para radiodifusão de TV digital

Fonte: [82]

A aplicação do tipo de máscara espectral é feita seguindo alguns critérios especificados na Tabela 18, isto para as classes A, B, C e especial.

rabela 10 - Chterios para aplicação de tipos de mascaras do espectro					
Classe da estação digital		A, B e C		Especial	
Tipo de modulação do canal adjacente previsto ou instalado na mesma localidade	Digital		Ausência de canal	Existência de canal adjacente	Ausência de canal adjacente
Distância em relação à estação de canal adjacente instalado na mesma localidade	< 400 m	> 400 m	adjacente previsto ou instalado na mesma localidade	previsto ou instalado na mesma localidade	previsto ou instalado na mesma localidade
Pdigital < Padjacente + 3 dB	Subcrítica	Crítico	Não Crítico	Crí	tion
Pdigital > Padjacente + 3 dB	Crítica	Chuca	Nao-Chuca	CI	lica
Pdigital = Potência ERP da estação Padjacente = Potência ERP da esta	o digital ação em cana	al adjacente			
Fonte: [82]					

Tabela 18 - Critérios para aplicação de tipos de máscaras do espectro

As características anteriores foram utilizadas para criar a máscara espectral no simulador SEAMCAT. Para as simulações, neste trabalho foi considerada a máscara espectral de tipo crítica, representada na Figura 24.



Fonte: Do Autor

Além disso, para as simulações foi considerada também o deslocamento da frequência de transmissão de 1/7 MHz (142,857 KHz) em relação à frequência central do canal, conforme o padrão de TV digital ISDB-TB, e pode ser observado na Figura 25.



Fonte: [82]

b. Receptor de TV

Os parâmetros detalhados a seguir foram usados para caracterizar o receptor de TV, que estão de acordo com o padrão para dispositivos receptores para televisão digital terrestre ABNT 15604 [74]. Os parâmetros de ganho da antena foram tirados de características de equipamentos comerciais.

Frequências intermedias de operação [MHz]	479,142856 (Canal 15)	
	581,142856 (Canal 32)	
	677,142856 (Canal 48)	
Largura de banda [MHz]	Full-seg: 5,7	
	One-seg: 0,43	
Altura da antena receptora [m]	1,5 (indoor)	
	6 (outdoor)	
Canha antona recontora (dBil	10 (antena externa)	
	4 (antena interna)	
Piso de ruído [dBm]	-96,42	
Sensibilidade do receptor [dBm]	-77,42	
	C/I = 19	
Critérios de Interferência [dB]	C/(N+I) = 19	
	(N+I)/N = 3	
	I/N = 0	

Tabela 19 - Sistema Receptor de TV - padrão ISDB-TB

Fonte: Do autor

Existem dois tipos de receptores: *Full-seg*, que é um dispositivo capaz de decodificar informações contidas nos 13 segmentos de transporte. *One-seg*, que é um dispositivo que decodifica exclusivamente o segmento central dos 13 segmentos. Para as simulações foi usado um receptor *Full-seg*, pois representa o caso mais crítico, relacionado com o impacto por interferências. Algumas características adicionais do receptor de TV segundo padrão ISDB-TB são mostradas na Tabela 20.

NÍVEL MÍNIMO DE ENTRADA			
FATOR	SÍMBOLO	VALOR	FORMULA/COMENTÁRIOS
Largura de Faixa Ocupada	B (MHz)	5,70E+06	
Constante de Boltzmann	k (Ws/k)	1,38E-23	
Temperatura Absoluta	T(Kelvin)	290	
Thermal Noise	Nt (dBm)	-106,42	Nt=10log (kTB)+30 (dBw => dBm)
Figura de Ruído do Receptor	Nr(dB)	10	Baseado em ensaios de laboratório realizados no Brasil
Limiar de C/N (Sistema Digital)	C/N (dB)	19	64QAM ; FEC 3/4
Mínima Potência do Sinal	Ps (dBm)	-77.4	Ps=Nt + Nr + C/N

Tabela 20 - Características do Receptor de TV digital

4.4.2. Parâmetros do sistema femtocelular 5G NR

Considerando que o sistema femtocelular 5G NR irá funcionar na banda de TVWS para ambientes interiores, os parâmetros utilizados foram baseados nas especificações: 3GPP TS 38.104 [26] para a estação base (*Base station - BS*) e o 3GPP TS 38.101 [27] para o equipamento do usuário (*User equipment – UE*). Esses parâmetros estão detalhados a seguir para poder simular tanto o enlace de descida (*Downlink*) como o enlace de subida (*Uplink*).

a. Parâmetros da estação base femtocelular

Dois grupos de parâmetros foram considerados para a estação base femtocelular (*FBS – Femtocell Base Station*): quando a FBS atua como transmissor (*Downlink*), detalhado na Tabela 21; e quando a FBS atua como receptor (*Uplink*), detalhado na Tabela 22.

Frequências operação [MHz]:	TV White Space (Co - canal e adjacente com canais do Sistema de TV)
Largura de banda [MHz]:	5, 10
Potência de transmissão [dBm]	20, 17, 11 (20dBm = 100mW)
Ambiente	Interior
Altura da FBS [m]	3
Antena	Omnidirecional
Ganho da antena da FBS [dBi]	3
Modelo de propagação	ITU-R P.525

Tabela 21 – Parâmetros do sistema transmissor da FBS

Fonte: Do autor

Tabela 22 – Parâmetros do sistema receptor da FBS

Frequências operação [MHz]:	TV White Space (Co-canal e Adjacente com canais do Sistema de TV)
Largura de banda [MHz]:	5, 10
Ambiente	interior
Altura da FBS [m]	3
Figura de Ruído [dB]	10
Ganho da antena da FBS [dBi]	3

Fonte: Do autor

A máscara espectral da FBS no sistema 5G NR foi determinada utilizando o padrão 3GPP TS 38.104 e as recomendações da ITU-R SM.328-11.
b. Parâmetros do equipamento do usuário

Dois grupos de parâmetros também foram considerados para o equipamento do usuário (UE – User Equipment): quando o UE atua como transmissor (Uplink), detalhado na Tabela 23; e quando o UE atua como receptor (Downlink) detalhado na Tabela 24. Esses parâmetros e a máscara espectral foram baseados nas especificações técnicas 3GPP TS 38.101.

Frequências operação [MHz]:	TV White Space (Co-canal e Adjacente			
	aos canais do Sistema de TV)			
Largura de banda [MHz]:	5, 10			
Potância de transmissão [dBm]	20, 17, 11 (Baixa potência)			
	Potência máxima é 23dBm			
Altura do UE	1,5			
Ganho da antena do UE [dBi]	0			
Modelo de propagação	ITU-R P.525			

Tabela 23 – Parâmetros do sistema transmissor do UE

Fonte: Do Autor

l abela 24 – Parametros (to sistema receptor do UE
Frequências operação [MHz]:	TV White Space (Co - canal e Adjacente
	com canais do Sistema de TV)
Largura de banda [MHz]:	5, 10
Ambiente	Interior e exterior
Altura do UE [m]	1,5
Figura de Ruído [dB]	10
Ganho da antena da BS [dBi]	0

Fonte: Do Autor

4.4.3. Modelos de propagação

Para as simulações foram utilizados os modelos:

a. Modelo de propagação Hata SRD (Short Range Devices)

Este modelo é uma modificação do Modelo Hata estendido e é usado para dispositivos de curto alcance (até 300 m), cuja antenas estejam operando em pequenas alturas (1.5 - 3 m).

b. Modelo de propagação ITU-R P1546-6 [87]

É um modelo para predição de sistemas broadcasting ou sistemas pontomultiponto no intervalo de frequências de 30 a 3000MHz para distancias de 1 - 1000 Km.

4.5. Cenários de simulação.

Três cenários principais podem ser analisados:

- Influência do sistema femtocelular 5G NR operando em TVWS sobre o sistema de TV;
- Influência do Sistema de TV sobre o sistema femtocelular 5G NR operando em TVWS;
- Influência entre sistemas femtocelulares 5G NR operando em TVWS.

Neste trabalho analisaremos a influência do sistema femtocelular 5G NR operando em TVWS sobre o sistema de TV, pois o objetivo, em princípio, é proteger aos usuários licenciados do sistema de TV.

Os sistemas Vitimas-Interferentes foram estudados considerando interferências em co-canal e em canal adjacente:

 Interferência Co-canal: femtocélula operando na mesma banda que a estação de TV, porém, a uma distância suficientemente afastada, como mostrado na Figura 26. O objetivo desta análise é calcular a relação da distância e o nível de interferência entre os dois sistemas.



Figura 26 – Interferência Co-canal

Fonte: Do Autor

 Interferência de canal adjacente: femtocélula operando em uma banda adjacente do canal de TV, e dentro da faixa de cobertura da estação de TV, como mostrado na Figura 27. O objetivo desta análise é estudar a interferência entre canais adjacentes segundo o nível da potência de operação da femtocélula e a distância com a torre transmissora de TV.



Figura 27 – Interferência canal adjacente

Fonte: Do Autor

Os cenários vítima-interferente estão detalhados na Tabela 25, considerando as interferências co-canal e adjacente.

Cenário	Tipo de interferência	Interferente	Antena do Interferente	Vítima	Antena da Vitima	Caso
		5G NR BS	Indoor	Receptor de	Indoor	1
		(Downlink)	(Downlink)		Outdoor	2
	Co Conal		Indoor	Receptor de	Indoor	3
0.1	CO-Callai	JG NR UE	Indoor	TV	Outdoor	4
Sistema		(Opiirik)	Outdoor	Receptor de	Indoor	5
		Outdoor		TV	Outdoor	6
interferinde no 5G NR BS		Receptor de	Indoor	7		
sistema de TV		(Downlink)	Indoor	TV	Outdoor	8
	Adiagonto		Indoor	Receptor de	Indoor	9
	Aujacente	OG NR UE		IIIuooi	TV	Outdoor
	(Upillik)		Outdoor	Receptor de	Indoor	11
			Outdoor	TV	Outdoor	12

Tabela 25 - Principais cenários de interferências

Sistema de		Transmissor do TV		5G NR BS	Indoor	13
TV	Co-Canal		Outdoor		Indoor	14
interferindo no	interferindo no		JO NR UE	Outdoor	15	
sistema		Tranamiaaar		5G NR BS	Indoor	16
femtocelular	Adjacente	do TV	Outdoor		Indoor	17
5G NR				SG NK UE	Outdoor	18
				5G NR BS2	Indoor	19
		Downlink)	Indoor		Indoor	20
		(DOWININK)	Outdoor5G NR UE5G NR BS25G NR BS2Indoor5G NR UE2Indoor5G NR UE2Outdoor5G NR BS2Outdoor5G NR UE25G NR UE25G NR UE25G NR UE25G NR UE2	Outdoor	21	
				5G NR BS2	Indoor	22
Interferência	Co-Canal		5G NR FBS1 (Uplink) Outdoor 5G NR UE2 5G NR BS2 5G NR UE2		Indoor	23
		5G NR FBS1		Outdoor	24	
		(Uplink)		5G NR BS2	Indoor	25
				5G NR UE2	Indoor	26
entre sistemas					Outdoor	27
femtocelulares				5G NR BS2	Indoor	28
5G NR		5G NK FBS1	Indoor	5G NR UE2	Indoor	29
		(Downiink)			Outdoor	30
				5G NR BS2	Indoor	31
	Adjacente		Indoor		Indoor	32
	-	5G NR FBS1		OG NR UEZ	Outdoor	33
		(Uplink)	Outdoor	5G NR BS2	Indoor	34
				5G NR UE2	Indoor	35
					Outdoor	36

Fonte: Do Autor

A Tabela 26 mostra as frequências centrais que foram utilizadas para as análises de interferência em co-canal, onde DL significa *downlink* e UP significa *uplink*.

Sistema	Frequência	Largura de	Sistema	Frequência	Largura de
Interferente	central [MHz]	Banda [MHz]	Vitima	Central [MHz]	Banda [MHz]
5G NR DL	479	5	ISDB-TB	479,142856	6
5G NR DL	581	5	ISDB-TB	581,142856	6
5G NR DL	677	5	ISDB-TB	677,142856	6
5G NR UL	479	5	ISDB-TB	479,142856	6
5G NR UL	581	5	ISDB-TB	581,142856	6
5G NR UL	677	5	ISDB-TB	677,142856	6
ISDB-TB	479,142856	6	5G NR DL	479	5
ISDB-TB	581,142856	6	5G NR DL	581	5
ISDB-TB	677,142856	6	5G NR DL	677	5
ISDB-TB	479,142856	6	5G NR UL	479	5
ISDB-TB	581,142856	6	5G NR UL	581	5
ISDB-TB	677,142856	6	5G NR UL	677	5

Tabela 26 – Frequências utilizadas para interferência em Co-Canal

Fonte: Do Autor

A Tabela 27 mostra as frequências centrais que foram utilizadas para as análises de interferência de canal adjacente.

Sistema	Frequência	Largura de	Sistema	Frequência	Largura de
Interferente	central [MHz]	Banda [MHz]	Vitima	Central [MHz]	Banda [MHz]
5G NR DL	485	5	ISDB-TB	479,142856	6
5G NR DL	587	5	ISDB-TB	581,142856	6
5G NR DL	683	5	ISDB-TB	677,142856	6
5G NR UL	485	5	ISDB-TB	479,142856	6
5G NR UL	587	5	ISDB-TB	581,142856	6
5G NR UL	683	5	ISDB-TB	677,142856	6
ISDB-TB	479,142856	6	5G NR DL	485	5
ISDB-TB	581,142856	6	5G NR DL	587	5
ISDB-TB	677,142856	6	5G NR DL	683	5
ISDB-TB	479,142856	6	5G NR UL	485	5
ISDB-TB	581,142856	6	5G NR UL	587	5
ISDB-TB	677,142856	6	5G NR UL	683	5

Tabela 27 - Frequências utilizadas para interferência de canal Adjacente

Fonte: Do Autor

4.5.1. Processo de Simulação

As simulações foram feitas de acordo aos seguintes passos:

- Inicialização, configuração dos parâmetros dos sistemas envolvidos (vítima e interferente);
- Definição dos parâmetros de simulação (potência, ganho das antenas, altura das antenas, cobertura, etc.);
- Definição do critério de interferência;
- Definição do número de eventos;
- Criação de uma estação de TV em localização predeterminada;
- Criação de um receptor de TV em localização predeterminada;
- Criação de uma FBS em localização predeterminada;
- Criação de UEs localizados aleatoriamente perto da FBS com uma distribuição uniforme;
- Utilização do modelo de canal para cada evento;
- Simulação de 20000 eventos;
- Análise dos dados.

4.5.2. Influência do Sistema femtocelular 5G NR sobre o sistema de TV

a. Influência em co-canal

Sistema femtocelular operando em enlaces *downlink* e *uplink*, na mesma frequência do canal de TV (sistema vítima), e alocado perto do contorno de proteção do sistema de TV, considerando antenas do receptor de TV localizados em ambientes interiores e exteriores, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Influência do sistema femtocelular em co-canal com o sistema de TV



Contorno de proteção do canal de TV

Distancia Variável

Fonte: Do Autor

Para cada cenário de simulação foram geradas 20000 amostras para obter resultados confiáveis, como mostrado na Figura 29.



Figura 29 – Número de amostras geradas

Fonte: Do Autor

• Caso 1:

FBS operando no modo *downlink*, alocada na mesma frequência que o canal de TV e localizada perto do contorno de proteção, para um receptor de TV com antena interna. A Figura 30 mostra o cenário do caso 1 gerado em SEAMCAT, onde o

transmissor de TV de classe B (ponto verde) está localizado na coordenada (0;0) e o receptor de TV está localizado a 29Km (ponto azul), na borda do contorno de proteção (29;0). Além disso, uma FBS (ponto vermelho) com localização fixa em (29,2;0) a 200m do receptor de TV; e UEs (pontos amarelos) localizados aleatoriamente perto da FBS.





Fonte: Do Autor

Para uma distância entre a FBS e o receptor de TV de 200 metros, a Figura 31 mostra a influência da variação das frequências utilizadas sobre a probabilidade de interferência entre os dois sistemas. As frequências intermediárias analisadas para o sistema de TV foram: 479,142856 MHz (Canal 15); 581,142856 MHz (Canal 32); e 677,142856 MHz (Canal 48). As frequências intermediárias para a FBS foram: 479 MHz, 581 MHz e 677 MHz.

Na Figura 31, o eixo **x** representa a relação C/I e o eixo **y** representa a função de distribuição cumulativa. Segundo o padrão ISDB-TB, o limite do critério de interferência é C/I= 19dB, isto permite encontrar as probabilidades de interferência² (PI) para as frequências estudadas.

² Nesta tese, a probabilidade de interferência é considerada na faixa de 0 a 1, onde 0 significa 0% de interferência e 1 significa 100% de interferência.



Figura 31 – Função de distribuição cumulativa para 479, 581 e 677 MHz.

Fonte: Do Autor

A Tabela 28 mostra um resumo das PI encontradas no caso 1.

Tabela 28 – Probabilidade de interferência	para três frequên	cias intermediárias
--	-------------------	---------------------

Frequência Vítima	Frequência interferente	Probabilidade de
[MHz]	[MHz]	interferência
CH15 (479,142856)	479	0,372
CH32 (581,142856)	581	0,400
CH48 (677,142856)	677	0,430

Fonte: Do Autor

A Figura 32 mostra a função de densidade de probabilidade para a frequência 677,142856 MHz conforme características do caso 1.



Figura 32 – Função densidade de probabilidade - CH48 (677,142856 MHz)

Fonte: Do Autor

A Figura 33 mostra a Função de distribuição cumulativa (CDF) para 5 distâncias de separação entre a FBS interferente (581 MHz) e o receptor de TV vítima (CH32 - 581,142856), para uma largura de banda do sistema interferente de 5 MHz. Observase que a maior distância entre a FBS e o receptor de TV menor será a probabilidade de interferência.





Fonte: Do Autor

A Tabela 29 apresenta um resumo das probabilidades de interferência de acordo a distância entre o receptor de TV vítima e a FBS interferente representado na Figura 33, para um critério de interferência de 19dB.

Distancia FBS – Receptor TV	PI
50 m	1.000
100 m	0.700
200 m	0.422
500 m	0.103
1000 m	0.016

Tabela 29 – Resumo de Probabilidade de Interferência, caso 1

Fonte: Do Autor

Observa-se que quando o sistema femtocelular está perto do contorno de proteção do sistema de TV existe alta PI; quanto maior é a distância, menor será a PI. Pode se concluir que a partir dos 500m de separação a PI, pode ser desprezada e o sistema femtocelular no caso 1 pode coexistir com o sistema de TV.

• Caso 2:

FBS operando no modo *downlink*, alocada na mesma frequência que o canal de TV e localizada perto do contorno de proteção, com características semelhantes do caso 1, porém, para um receptor de TV com antena externa. A Tabela 30 apresenta o resumo da PI do cenário do caso 2 para um critério de interferência de 19dB; além disso, a Figura 34 mostra a CDF neste cenário.

Distância FBS – Receptor TV	PI
50 m	1.000
100 m	0.803
200 m	0.518
500 m	0.108
1000 m	0.010
1200 m	0.005

Tabela 30 – Resumo de Probabilidade de Interferência, caso 2

Fonte: Do Autor





Fonte: Do Autor

Nota-se que os resultados do caso 1 (antena TV interna) e caso 2 (antena de TV externa) são um pouco diferentes, existindo maior interferência quando o receptor de TV tem uma antena externa, no entanto, quando a distância é maior a PI de ambos os casos vai se tornando semelhante.

• Caso 3:

Sistema femtocelular operando no modo *uplink*, alocada na mesma frequência que o canal de TV e localizada perto do contorno de proteção. Neste caso, os UEs estão localizados no mesmo ambiente interno que a FBS. Considera-se que a antena do receptor de TV é interna. A Tabela 31 apresenta o resumo da PI do cenário do caso 3 para um critério de interferência de 19dB, além disso, a Figura 35 mostra a CDF neste cenário.

Distancia FBS – Receptor TV	PI
50 m	0.616
100 m	0.225
200 m	0.064
500 m	0.007
1000 m	0.001
1200 m	0.001

Tabela 31 – Resumo de Probabilidade de Interferência, caso 3

Fonte: Do Autor



Figura 35 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância entre o receptor de TV e a FBS, caso 3

A Figura 36 mostra a função densidade de probabilidade (PDF) de ambos sistemas para o caso 3, com uma distância de 200m.

Fonte: Do Autor



Figura 36 – PDF dos sinais recebidos pelo receptor de TV (dRSS e iRSS), distância de 200m, caso 3

Fonte: Do Autor

• Caso 4:

Sistema femtocelular operando no modo *uplink*, alocada na mesma frequência que o canal de TV e localizada perto do contorno de proteção, neste caso, os UEs estão localizados no mesmo ambiente interno que a FBS. Considera-se também que a antena do receptor de TV é externa. A Figura 37 mostra a CDF neste cenário, além disso, a Tabela 32 apresenta o resumo da PI do cenário do caso 4 para um critério de interferência de 19dB.

Distancia FBS – Receptor TV	PI
50 m	0.736
100 m	0.317
200 m	0.128
500 m	0.023
1000 m	0.001
1200 m	0.000



Figura 37 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância entre o receptor de TV e a FBS, caso 4

Fonte: Do Autor

• Caso 5:

Sistema femtocelular operando no modo *uplink*, alocada na mesma frequência que o canal de TV e localizada perto do contorno de proteção. Neste caso, os UEs estão localizados no ambiente exterior perto da FBS interior. Considera-se também que a antena do receptor de TV é interna. A Figura 38 apresenta o resumo da PI do cenário do caso 5 para um critério de interferência de 19dB, além disso, a Tabela 33 mostra a CDF neste cenário.

Distancia FBS – Receptor TV	PI
50 m	0.99
100 m	0.79
200 m	0.447
500 m	0.115
1000 m	0.012
1200 m	0.007

Tabela 33 – Resumo de Probabilidade de Interferência, caso 5



Figura 38 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância entre o receptor de TV e a FBS, caso 5

Fonte: Do Autor

• Caso 6:

Sistema femtocelular operando no modo *uplink*, alocada na mesma frequência que o canal de TV e localizada perto do contorno de proteção. Neste caso, os UEs estão localizados no ambiente exterior perto da FBS interior. Considera-se também que a antena do receptor de TV é externa. A Figura 39 apresenta o resumo da PI do cenário do caso 6 para um critério de interferência de 19dB, além disso, a Tabela 34 mostra a CDF neste cenário.

Distancia FBS – Receptor TV	PI
50 m	0.999
100 m	0.943
200 m	0.731
500 m	0.304
1000 m	0.045
1200 m	0.023

Tabela 34 – Resumo de Probabilidade de Interferência, caso 6



Figura 39 – CDF para 50, 100, 200, 500, 1000 e 1200 m de distância entre o receptor de TV e a FBS, caso 6

Fonte: Do Autor

A Tabela 35 mostra as probabilidades de interferência da influência do sistema femtocelular sobre o sistema de TV, quando operando na mesma faixa de frequências (co-canal), com uma potência de 11dBm, e estando perto do contorno de proteção (29 Km) do sistema de TV de Classe B.

Distancia	Probabilidade de Interferência					
FBS – Receptor TV	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
50 m	1.000	1.000	0.616	0.736	0.99	0.999
100 m	0.700	0.803	0.225	0.317	0.79	0.943
200 m	0.422	0.518	0.064	0.128	0.447	0.731
500 m	0.103	0.108	0.007	0.023	0.115	0.304
1000 m	0.016	0.010	0.001	0.001	0.012	0.045
1200 m	-	0.005	0.001	0.000	0.007	0.023

Tabela 35 – Resumo de PI da Influência do Sistema femtocelular 5G NR sobre o sistema de TV em co-canal

Fonte: Do Autor

Pode se concluir que a partir de uma certa distância (aproximadamente 500m) a PI do sistema femtocelular no sistema de TV começa a ser baixa. Além disso, a partir de uma distância de 1000m a PI é quase nula, o que significa que os sistemas envolvidos podem coexistir. Por outro lado, essa distância pode ser encurtada se diminuímos a potência do sistema femtocelular.

b. Influência em canal adjacente

Sistema femtocelular operando em enlaces *downlink* e *uplink*, em frequência adjacente com o canal de TV (sistema vítima), e alocado dentro da área de cobertura do sistema de TV, considerando antenas do receptor de TV localizados no ambiente interior e exterior, como mostrado na Figura 40.

A frequência utilizada para o canal de TV foi CH32 (581,142856 MHz) e a frequência intermediaria para o sistema femtocelular foi 587 MHz pois é o canal adjacente mais suscetível à interferência, isto por causa do deslocamento da frequência de transmissão de 1/7 MHz (142,857 KHz) em relação à frequência central do canal, conforme o padrão de TV digital ISDB-TB.





Contorno de proteção do canal de TV

Fonte: Do Autor

• Caso 7:

FBS operando no modo *downlink*, alocada em frequência adjacente ao canal de TV, para um receptor de TV com antena interna. A Figura 41 mostra o cenário do caso 7 gerado em SEAMCAT, onde o transmissor de TV de classe B (ponto verde) está localizado na coordenada (0;0) e o receptor de TV está localizado a 100m (ponto azul). Além disso, uma FBS (ponto vermelho) está localizada a 1m do receptor de TV, e os UEs (pontos amarelos) localizados aleatoriamente perto da FBS.



Fonte: Do Autor

A Figura 42 mostra a função de densidade de probabilidade para os sinais recebidos pelo receptor de TV dRSS e iRSS em frequências adjacentes, conforme características do caso 7.



Figura 42 – Função densidade de probabilidade para dRSS e iRSS, caso 7

Fonte: Do Autor

A Figura 43 mostra a Função de distribuição cumulativa (CDF) para 6 distâncias de separação (0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m) entre a FBS interferente (587 MHz) e o receptor de TV vítima (CH32 - 581,142856 MHz), para uma largura de banda do sistema interferente de 5 MHz. Além disso, a distância entre o transmissor de TV e o receptor de TV é 100m. Observa-se que, considerando o critério de interferência de 19dBm, a probabilidade de interferência para todas as distancias é 0.



Figura 43 – CDF para 0,5m; 1m; 1,5m; 2m; 2,5m e 3 m de distância entre o receptor de TV e a FBS, e 100m entre o transmissor e receptor de TV, caso 7

Fonte: Do Autor

A Figura 44 mostra a Função de distribuição cumulativa (CDF) para 6 distâncias de separação (0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m) entre a FBS interferente (587 MHz) e o receptor de TV vítima (CH32 - 581,142856 MHz), para uma largura de banda do sistema interferente de 5 MHz. Além disso, a distância entre o transmissor de TV e o receptor de TV é 1Km.

A Tabela 36 apresenta um resumo das probabilidades de interferência de acordo a distância entre o receptor de TV vítima e a FBS interferente representado na Figura 44, para um critério de interferência de 19dB.



Figura 44 – CDF para 0,5m; 1m; 1,5m; 2m; 2,5m e 3 m de distância entre o receptor de TV e a FBS, e 10 Km entre o transmissor e receptor de TV, caso 7

Fonte: Do Autor

Tabela 36	– Resumo de	Probabilidade	de	Interferência	, caso	7

Distancia FBS – Receptor TV	PI
0,5m	0.553
1,0m	0.571
1,5m	0.554
2,0m	0.574
2,5m	0.599
3,0m	0.582

Fonte: Do Autor

Considerando o critério de interferência de 19dBm, observa-se que na Figura 43 e Figura 44, a PI para todos as distâncias entre o receptor de TV e a FBS, não têm variações significativas.

4.6. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas simulações sobre a probabilidade de interferência em distintos cenários.

Em co-canal, foi encontrado que é necessária uma certa distância (500m a 1 Km, segundo o caso) entre o receptor de TV e o transmissor do sistema femtocelular para evitar interferências. Segundo [88], a FCC especificou quão longe do contorno de proteção um dispositivo de TVWS deve estar para ter permissão de transmissão. A distância além do contorno depende da altura da antena do dispositivo de TVWS, pois quanto mais alta a antena, maior a interferência em um receptor de TV. Em co-canal, a distância é de 6 km para antenas com menos de 3 metros de altura, 8 km para antenas entre 3 e 10 metros de altura e 14,4 km para antenas entre 10 e 30 metros de altura, essas alturas são escolhidas dependendo do tipo de sistema que utiliza TVWS. No cenário estudado nesta tese, para uma estação de TV classe B com contorno de proteção de 29Km, o sistema femtocelular deveria estar a 35Km (29 +6 Km) conforme as especificações da FCC. No entanto, nossos resultados mostraram que essa distância pode ser reduzida a 30Km (29+ 1 Km), pois segundo os casos simulados, a 1 Km do contorno de proteção não existe mais interferências.

Em canal adjacente, quando femtocélulas operando em baixa potência (11dbm) não existe interferência significativa perto da estação de TV. Estes resultados podem ser utilizados para estabelecer limites e requisitos para a coexistência desses dois sistemas.

Porém, um requisito para que femtocélulas possam ser implantadas em ambientes interiores é que possam encontrar oportunidades de TVWS. No próximo capítulo, uma nova metodologia baseada em sensoriamento espectral e banco de dados é proposto para esse objetivo.

Capítulo 5 Arquitetura proposta para encontrar canais livres de TV

Devido a sucessos de vários projetos pilotos sobre a utilização de TVWS em todo o mundo, [89] afirma que um lançamento massivo dessa banda está no horizonte.

No entanto, vários desafios ainda precisam ser enfrentados. Para que dispositivos de CR possam operar em TVWS eles precisam conhecer quais faixas de frequência do espectro estão sendo ocupadas pelos serviços de TV e quais podem ser consideradas como oportunidades de transmissão. Existem dois esquemas para conseguir esse conhecimento: sensoriamento espectral (*spectrum sensing*); e uso de banco de dados de geolocalização.

O sensoriamento espectral foi muito estudado na literatura, porém, o problema do terminal escondido ainda é um desafio, que de momento, somente pode ser mitigado pelo sensoriamento cooperativo ou resolvido utilizando banco de dados de geolocalização. Este último é considerado pelos órgãos reguladores como a principal técnica para acesso oportunista e dinâmico ao espectro de TVWS, por ser economicamente mais viável.

No método de banco de dados, os dispositivos que irão utilizar a banda de TVWS devem entrar em contato com um banco de dados e este deve responder com informações dos canais disponíveis. Para isso, o banco de dados precisa de informações, como a geolocalização dos transmissores de TV e dos dispositivos que irão utilizar a banda de TVWS.

Essa metodologia funciona bem em exteriores pois a precisão da geolocalização é boa; no entanto, técnicas de localização em ambientes interiores ainda são ineficientes. Assim, é necessário o estudo de novos métodos que permitam encontrar canais livres nesses ambientes. Neste capítulo propomos uma arquitetura que permite obter informações de TVWS em ambientes interiores sem necessidade de fornecer a localização do dispositivo de CR. Esta arquitetura inclui um modelo de banco de dados combinado com o método de sensoriamento espectral bayesiano.

5.1. Metodologias para encontrar TVWS

5.1.1. Sensoriamento espectral

Na tecnologia de CR, o sensoriamento espectral é o processo mediante o qual é feita a inspeção do espectro de forma dinâmica e contínua para se encontrar faixas de frequências livres. Entre as técnicas de sensoriamento espectral, temos [56]:

- Detecção de Energia: Neste método, a intensidade de um sinal recebido é comparada com um limiar para decidir se há a presença ou não de um PU. Considera-se que o canal está ocupado quando o nível de energia do sinal detectado é mais alto que o limiar de comparação. Se o nível do sinal estiver abaixo do limiar, diz-se que aquele canal está livre.
- Filtro Casado: Este método precisa conhecer completamente as características do sinal a ser detectado. Neste método o CR tem que demodular o sinal do PU.
- Cicloestacionariedade: Este método é utilizado quando não se tem conhecimento perfeito do sinal a ser analisado, mas conhecem-se algumas de suas características, como a periodicidade, frequência da portadora, ciclos prefixados, etc. Para detectar o sinal é usada uma função de correlação cíclica, que permite diferenciar o sinal do ruído. Assim, ele é mais robusto quanto a interferências e ruído.
- Detecção cooperativa: Este método utiliza um conjunto de dispositivos de CR que realizam o sensoriamento e compartilham as informações para melhorar a detecção. Com este método, um aumento na probabilidade de detecção do PU é obtido. Por outro lado, a detecção cooperativa tem desvantagens como o incremento do processamento computacional, o incremento no tráfico nas redes, etc.
- Métodos Híbridos: São combinações dos métodos previamente descritos. São mais robustos, no entanto devem ser tomadas certas precauções para que o sensoriamento não tenha muito custo computacional ou precise de muito tempo para determinar se o canal está ocupado ou não.

A Tabela 37 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens das técnicas de sensoriamento espectral encontradas na literatura [15].

Técnica de Sensoriamento	Vantagens	Limitações
Detecção de Energia	 Simples de implementar quando a intensidade do ruído é conhecida pelo receptor. 	 Incerteza da potência do ruído resulta em detecção falsa; Erro de estimativa da potência do ruído pode levar a <i>SNR wall;</i> Incapaz de detectar sinais em condições de SNR baixo.
Filtro Casado	 Detecção ótima. Custo computacional comparativamente baixo. 	 Requer informações detalhadas dos parâmetros dos sinais do PU; Alta complexidade de implementação.
Cicloestacionariedade	 Robusto mesmo em baixa SNR. Capaz de diferenciar ruídos e sinais. 	 Custo da computação é alto; São necessárias algumas informações sobre o sinal do PU.
Detecção de forma de onda	 Apresenta bom desempenho mesmo em baixo SNR se o padrão de conhecimento for grande. 	 Suscetível a erros de sincronização.
Detecção Wavelet	 Bom desempenho em sinais de banda larga. 	 Alto custo computacional; Não é muito eficaz no caso de sinais de espalhamento espectral.
Sensoriamento cooperativo	 Solução eficaz para problemas como shadowing, multi-path fading e terminal oculto. 	 Requer o desenvolvimento de algoritmos de detecção eficientes e técnicas de detecção complexas.

Tabela 37 - Técnicas de sensoriamento espectral

Fonte: [15]

Essas técnicas de sensoriamento espectral foram amplamente estudadas na literatura. No entanto, vários resultados de testes de campo foram insatisfatórios [90]. Foi assim que órgãos como a FCC [25], a Ofcom [23] e o IEEE, consideraram que a utilização de banco de dados é o mecanismo mais confiável e que deve ser o método principal para encontrar canais livres, tornando as técnicas de sensoriamento espectral opcionais. Os CRs devem acessar periodicamente a um banco de dados geolocalização para adquirir a lista de canais TVWS livres [91].

5.1.2. Sensoriamento espectral auxiliado por banco de dados

Este método utiliza banco de dados de geolocalização para determinar quais canais estão disponíveis em um certo local. Os bancos de dados de TVWS são projetados para armazenar informações tanto dos sistemas licenciados de TV (geolocalização, ambiente, frequências de operação, potência de transmissão,

contorno de proteção, regulamentos, etc.) quanto dos CRs. Neste método, para conseguir acesso ao espectro, os dispositivos de CR devem consultar no banco de dados as frequências disponíveis de acordo com sua geolocalização (latitude e longitude).

Usando esses bancos de dados de geolocalização, podem ser gerados mapas de ambiente de rádio (*REM - Radio Environment Map*). REM é uma ferramenta que fornece um meio prático para a operação de redes de CRs fornecendo acesso oportunista ao espectro [92], [93]. Os REMs podem construir conhecimento da ocupação do espectro a partir de medições coletadas pelos sensores, logo eles podem estimar o estado do espectro em locais onde não há dados de medição. Dessa forma, dispositivos de CR sem funcionalidades avançadas poderiam operar de maneira eficiente.

Como vimos no capítulo 3, o espectro da banda de TV é quase estático, além disso, as posições dos transmissores de TV também são fixas. Essas características fazem com que o banco de dados possa atender bem os requisitos de comunicação dos CRs.

Atualmente, apesar da pesquisa no tópico de banco de dados de TVWS ser limitada, essas arquiteturas em geral contêm componentes conjuntos de sistemas de geolocalização, banco de dados do sistema de TV e módulos de sensoriamento espectral.

Nessa arquitetura o CR envia sua geolocalização acompanhada com algum tipo de relatório de sensoriamento espectral para consultar no banco de dados quais TVWS estão disponíveis nesse local. Em seguida, o banco de dados processa as informações fornecidas e responde enviando uma lista de canais de TV livres e as características de transmissão permitidas. A Figura 45 ilustra essa arquitetura conjunta.

Observa-se que nessa arquitetura, os usuários UE1, UE2, UE3, UE4 realizam um sensoriamento espectral dos canais de interesse e enviam relatórios junto com sua geolocalização para um banco de dados. Nesse banco de dados os reportes de sensoriamento espectral dos UEs são combinados, além disso, esses resultados são comparados com as informações das estações de TV. Finalmente o banco de dados calcula e envia listas de canais disponíveis para cada UE.



Figura 45 - Sensoriamento espectral auxiliado por banco de dados

Fonte: Do Autor

a. Desafios na exploração de TVWS usando banco de dados

Segundo [89], vários projetos piloto de TVWS foram conduzidos utilizando bancos de dados de geolocalização. Nesses estudos alguns desafios foram encontrados: em princípio há uma necessidade que os bancos de dados de geolocalização sejam subdivididos em bancos de dados regionais e nacionais, devido a que cada região opera sob um regime regulatório diferente. Por outro lado, um protocolo comum de comunicação entre bancos de dados é necessário para que várias operadoras de TVWS possam operar em uma determinada região. Ademais, falta definir formatos de consulta a bancos de dados de TVWS.

Além desses desafios, identificamos que a metodologia de banco de dados está fortemente baseada na correta geolocalização dos dispositivos de CR, que funciona bem em ambientes exteriores. No entanto, em ambientes interiores as técnicas de geolocalização ainda são ineficientes, o que representa um desafio para a utilização de TVWS nesses cenários.

b. O problema da localização

Femtocélulas foram pensadas para serem instaladas pelos próprios usuários em qualquer lugar, geralmente em ambientes interiores. Isto significa que os operadores de rede não conhecem a real localização desses dispositivos. No entanto, para que esses sistemas possam ser utilizados é necessário saber sua localização.

A localização em interiores recentemente retomou um aumento de interesse devido à ampla gama de serviços que pode fornecer, especialmente para aplicações de internet das coisas [94]. Uma das características mais importantes é a precisão com que a posição do dispositivo é obtida. Porém, a presença de obstáculos e efeitos de multicaminho fazem com que a localização não seja eficiente nesses ambientes.

Embora exista alguns trabalhos como [48], que pesquisaram a alocação de espectro para femtocélulas usando banco de dados, nenhum questiona essas considerações. Portanto, ainda é necessário saber como alocar espectro de TVWS em femtocélulas com a restrição que impõe a localização em cenários interiores.

Por outro lado, existe uma grande discussão na comunidade acerca da privacidade das pessoas de serem localizadas pela rede sem sua autorização. Saber que seu paradeiro pode ser exposto pode desencorajar aos usuários a participar de sistemas de CR [95], dificultando assim a adoção e implantação desta tecnologia.

A exposição das informações de localização levanta sérias questões de privacidade, pois os operadores desses bancos de dados poderiam monitorar facilmente a atividade diária dos usuários, por exemplo, onde vai fazer compras, quais os círculos sociais que frequenta, onde e quando come, etc. O que, combinado com outras informações podem revelar caraterísticas pessoais sobre o indivíduo, incluindo seu comportamento, preferências, hábitos pessoais, estado de saúde, crenças, etc. [95].

5.2. Metodologia proposta

Nosso sistema proposto é baseado na combinação de três elementos:

- Sensoriamento espectral bayesiano;
- Utilização das características do cenário topológico do sistema de TV;
- Arquitetura lógica de comunicação.

Juntos permitem a concepção de um método que, usando um banco de dados, permite encontrar canais de TVWS sem necessidade da localização dos CRs.

5.2.1. Sensoriamento espectral bayesiano

Geralmente, as técnicas de sensoriamento espectral convencionais analisam a banda de interesse canal a canal, isto é, decidem separadamente se um canal está ocupado ou não. No método de estimação bayesiana (*BEED – Bayesian estimation-based energy detection*) medições de todos os canais de uma banda são feitas para depois determinar quantos e quais canais estão ocupados [96]. Em nosso cenário, como a banda de TV raramente muda seu comportamento, o método bayesiano se apresenta como uma boa oportunidade de solução.

Neste método de detecção, um sinal recebido y é representado como a soma do sinal primário x, com o ruído w, onde o número do canal é representado por i e o número da amostra por n:

$$y_i(n) = x_i(n) + w_i(n)$$

onde as variáveis são compostas por vetores dados por:

$$y(n) = [y_1(n), y_2(n), \dots, y_{K_T}(n)]^T$$
$$x(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_{K_T}(n)]^T$$
$$w(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_{K_T}(n)]^T$$

Nesse método, faz-se primeiramente medidas de todos os canais; a seguir, eles são divididos em dois conjuntos: R_1 que representa o conjunto de canais que estão sendo ocupados, e R_2 que representa o conjunto de canais livres.

Para todos os canais *i* que compõem o conjunto R_2 , tem-se $x_i(n) = 0$.

A potência dos canais ocupados $\sigma_i^2 - \sigma^2$ ($i \in R_1$) e o número deles não são conhecidos *a priori*, bem como a potência do ruído σ^2 . Seja $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_Q]^T$ o vetor das potências em cada canal, dadas por:

$$\lambda_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} |y_i|^2$$

Assumindo-se que existem *K* canais ocupados, o vetor λ é rearranjado em ordem decrescente:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_K > \lambda_{K+1} = \lambda_{K+2} = \dots = \lambda_Q = \sigma^2$$

O problema trata da estimação do número de canais ocupados. Assim, os canais com maior potência são considerados ocupados. O número de canais ocupados pode ser estimado a partir das medições de uma amostra: R = [y(1), y(2), ..., y(N)].

A probabilidade de *K* pode ser expressa como:

$$p(K|R) = \frac{p(R|K)p(K)}{p(R)}$$

Como o valor de p(R) é constante, e p(K) é não relevante, o valor mais provável de *K* é aquele que maximiza ao numerador. Isto é, maximizar p(K|R) é equivalente a maximizar p(R|K). Dessa forma, o cálculo de p(R|K) pode ser feito pelo modelo bayesiano, usando-se a teoria das probabilidades.

Seja:

$$\theta^{K} = (\sigma_{1}, \sigma_{2}, \dots, \sigma_{K}, \sigma)$$

que denota o conjunto de parâmetros não conhecidos no modelo de canais ocupados *K*. A probabilidade condicional de *R* pode ser escrita como:

$$p(R|K) = \sum_{\theta^{K}} p(R|\theta^{K}, K) \, p(\theta^{K}|K)$$

Após procedimentos apresentados de forma completa em [96], a BEED é dada por:

$$BEED_{K} = \log\left(\left(\prod_{i=1}^{K} \lambda_{i}\right) \left(\frac{1}{Q-K} \sum_{i=K+1}^{Q} \lambda_{i}\right)^{Q-K}\right) + C(K)$$

onde:

$$\prod_{i=1}^{0} \lambda_i = 1$$

e:

$$C(K) = \frac{1}{2N} \left(\log(Q - K) + K \log\left(\frac{2}{\pi}\right) \right) + \frac{K}{2N} \log(N)$$

Finalmente, o número de canais ocupados K é:

$$\widehat{K} = \arg\min_{j=0,1,\dots,Q-1} BEED_j$$

O detector bayesiano, também é apresentado como solução para o problema da incerteza do ruído [97]. Simulações foram feitas em [96] para determinar o desempenho do BEED em comparação com o método de detecção de energia convencional. Probabilidade de detecção (Pd) e falso alarme (Pfa) foram utilizados como métricas de desempenho.

A Figura 46 ilustra o desempenho do BEED e da detecção de energia sob um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) e um canal com desvanecimento Rayleigh. Como pode ser visto nas figuras, o BEED tem quase o mesmo desempenho que a detecção de energia ideal (sem incerteza de ruído).



Figura 46 - Pd e Pfa × SNR para canais AWGN (esquerda) e desvanecimento Rayleigh (direita)

Fonte: [96]

a. Simulações no cenário de TV Digital

Para demostrar a aplicação do detector Bayesiano, ele foi simulado para o cenário da TV Digital, com 37 canais atualmente disponíveis na banda UHF. Cada canal foi gerado com nível de potência aleatória, como mostrado na Figura 47.



Fonte: Do Autor

No algoritmo Bayesiano é calculado um número BEED para cada possibilidade de ocupação dos canais. Na Figura 48, apresenta-se os números BEED calculados para todas as possibilidades de ocupação.





Fonte: Do Autor

O número BEED de menor valor representa o número de canais ocupados. No exemplo apresentado o BEED de menor valor é o 32, o que significa que os 32 canais com maior potência são considerados como ocupados e os 5 restantes, de menor potência, são considerados como livres.

5.2.2. Cenário topológico

O cenário topológico é ilustrado na Figura 49, onde as torres transmissoras do sistema de TV, com localização conhecida, tipicamente estão instaladas em vários lugares da área de interesse. Por outro lado, os sistemas femtocelulares, com localização desconhecida, também são instalados na mesma área.





Fonte: Do Autor

Nesse cenário observa-se que, segundo sua posição, cada FBS e UE receberão diferentes níveis de potência do sinal de cada transmissor de TV. Assim, cada dispositivo femtocelular deve formar um vetor de potências dos transmissores de TV diferente dos outros, como detalhado nas equações a seguir:

$$UE1 = [P(TV_1, UE_1), P(TV_2, UE_1), P(TV_3, UE_1), P(TV_4, UE_1), P(TV_5, UE_1)]$$
$$UE2 = [P(TV_1, UE_2), P(TV_2, UE_2), P(TV_3, UE_2), P(TV_4, UE_2), P(TV_5, UE_2)]$$
$$UE3 = [P(TV_1, UE_3), P(TV_2, UE_3), P(TV_3, UE_3), P(TV_4, UE_3), P(TV_5, UE_3)]$$

onde: P_(TV_n, UE_m), é a potência recebida do transmissor de TV **n** na posição do UE **m**.

Ou seja, a medida da potência do sinal do transmissor TV1, deve ser diferente em cada UE e FBS, e dependerá da distância entre o transmissor de TV e o UE.

Simulações em um cenário urbano foram feitas a fim de comprovar a potência recebida pelos UEs localizados a 1, 2, 5, 10, 15, 20 e 25Km de distância de uma estação de TV de classe B, que transmite a uma potência de 59dBm. Foi utilizado o modelo de propagação ITU-R P1546-6. Nos resultados mostrados na Figura 50 e Tabela 38 observa-se que existe uma diferença considerável entre as potências recebidas segundo a distância.





Fonte: Do Autor

Tabela 38 – Potências média e mediana a distância variável

Distância entre o	Potência recebida [dBm]		
Transmissor de TV e UE	Média	Mediana	
1Km	-21,90	-21,80	
2Km	-32,71	-32,74	
5Km	-45,53	-45,50	
10Km	-55,75	-55,72	
15Km	-62,16	-62,12	
20Km	-67,64	-67,66	
25Km	-72,32	-72,35	

Se trasladamos isso para o caso de uma femtocélula teremos o cenário da Figura 51. Neste cenário, considerando a estabilidade da propagação do sistema de TV, quando o UE estiver mais perto da femtocélula, receberá um vetor de potências mais semelhante que o recebido pela femtocélula, isso será entendido pelo sistema como dois dispositivos que estão pertos um do outro.





```
Fonte: Do Autor
```

Além disso, a obtenção de medidas de dois dispositivos pertos aumentará a confiabilidade do sensoriamento espectral bayesiano.

5.2.3. Arquitetura lógica de comunicação

Na literatura ainda não está definida como os sistemas de RC irão enviar informações de sensoriamento espectral ao banco de dados, ou seja, não há um canal definido para enviar esses relatórios. No entanto, em um cenário femtocelular esses canais já estão disponíveis tanto para os UEs quanto para a FBS. Em redes celulares os UEs estarão conectados à rede por meio das estações macrocelulares, e a FBS por meio de uma conexão ADSL.

Assim, nesta arquitetura proposta, tanto a FBS como os UEs realizam o sensoriamento espectral, realizam medidas de intensidade do sinal dos canais de TV, e cada um envia o relatório do sensoriamento espectral a um servidor com banco de

dados; o UE por meio da rede macrocelular, e a FBS por meio da conexão ADSL, conforme mostrado na Figura 52.



Fonte: Do Autor

O servidor irá comparar os relatórios de sensoriamento espectral do método bayesiano fornecido pelos UEs com o fornecido pela FBS e determinará se os dispositivos estão próximos ou não, tendo duas ações:

- Se os relatórios são diferentes, os UEs continuarão conectados à rede mediante o enlace com a macrocélula.
- Se os relatórios são similares e ainda existe comprovação de canais livres, os UEs poderão ser alocados nos canais de TVWS para sua comunicação com a FBS.

5.2.4. Operação do banco de dados de TVWS

A forma de funcionamento do banco de dados proposto é ilustrada na Figura 53. Após cada elemento do sistema femtocelular (FBS e UEs) enviarem relatórios para o servidor, ele deve comparar os números BEEDs do algoritmo bayesiano, e determinar quais canais em comum estão livres. Seguidamente, esses dados são comparados com as informações do banco de dados do sistema licenciado de TV. Assim, depois é determinado a lista de canais disponíveis nessa área.



Figura 53 – Operação da arquitetura de banco de dados proposto

Fonte: Do Autor

5.3. Conclusão

Neste capítulo, uma nova arquitetura para a utilização de TVWS em femtocélulas foi proposta, esta arquitetura permite encontrar canais de TVWS sem utilizar a localização da FBS e dos UEs. Somente comparando os vetores do sensoriamento espectral é possível alocar recursos de espectro tanto na FBS como nos UEs.

A arquitetura proposta exemplifica um modelo prático de sistema onde não é necessário utilizar a localização dos CRs, isto é logrado combinando: (a) a técnica de sensoriamento espectral bayesiano descrito na seção 5.2.1, para obter informações de TVWS disponíveis nos locais com posição desconhecida da FBS e dos UEs; (b) o

conhecimento do cenário topológico do sistema de TV, descrito na seção 5.2.2 e; (c) a utilização de uma arquitetura lógica de comunicação especifica para sistemas femtocelulares, descrito na seção 5.2.3.

A implantação realista deste sistema proposto em redes femtocelulares pode ser conseguida pois diferente da maioria dos casos onde os sistemas de CR são utilizados, em sistemas femtocelulares já existe um canal de controle (conexão via macrocélula e conexão via ADSL) por onde os relatórios do sensoriamento espectral podem ser enviados.
Capítulo 6 PoC da arquitetura proposta utilizando plataformas de SDR

Um sistema de rádio definido por *software* (SDR) é um sistema de comunicação em que os componentes sistêmicos são implementados por meio de *software*. Um SDR é composto de: Um dispositivo que recebe o sinal de uma fonte e o converte para uma faixa frequências e amplitudes que sejam processáveis por conversores digitais, um dispositivo digitalizador que converte o sinal analógico em digital e um software que tenha a capacidade de processar o sinal digitalizado.

A Figura 54 ilustra as partes principais de um SDR, que são descritas a seguir:

- Antenas Inteligentes: com capacidade de mudar de tamanho elétrico;
- Front End RF: módulo de rádio frequência que capta o sinal analógico e converte para uma frequência intermediária e vice-versa;
- ADC e DAC: convertem um sinal analógico em digital e vice-versa;
- Processador Digital: faz o tratamento do sinal na sua forma digital.



Figura 54 – Arquitetura de SDR

Fonte: [56]

Existem várias plataformas para o desenvolvimento de aplicações de SDR, entre elas temos o **GNU Radio**, que é de código aberto e é compatível com a maioria de equipamentos de SDR. Consiste em um conjunto de ferramentas representadas por blocos que executam uma tarefa especifica (filtragem, codificação, FFT, acesso ao hardware, etc.), e que podem ser ligados através de linhas de conexão para fazer processamento de sinais.

GNU Radio é uma ferramenta baseada em três níveis: **GNU Radio Companion**, Python e C++. As aplicações no **GNU Radio Companion** são desenvolvidas em uma interface gráfica, por meio de blocos e linhas de fluxo. Essas aplicações gráficas geram código em Python, que é uma linguagem de programação de alto nível. Os blocos são rotinas de código escritas em linguagem C++. **GNU Radio** vincula blocos escritos em C++ e os executa através de Python.

Neste capítulo apresentamos uma prova de conceito da nova arquitetura proposta no capítulo 5. Para isso utilizamos equipamentos de SDR da empresa Ettus Research e o software de desenvolvimento **GNU Radio**.

6.1. Equipamentos usados no Protótipo

Os equipamentos da Ettus utilizados são USRP N210 e USRP B100, ambos suportados pelo software **GNU Radio**, são detalhados a seguir:

USRP Networked Series: USRP N210. Caracteriza-se por ter conectividade com o computador host mediante cabo ethernet, ADC de 100 MS/s e DAC de 400 MS/s. Além disso, tem um Front-end SBX, que opera como transceptor (Rx/Tx) na faixa de frequência de 400 a 4400 MHz.

USRP Bus series: USRP B100. caracteriza-se por ter conectividade com o computador host mediante cabo USB, ADC de 64 MS/s e DAC de 128 MS/s. Ele tem um *front-end* WBX, que opera como transceptor (Rx/Tx) na faixa de frequência de 50 a 2200 MHz.

6.2. Descrição do Protótipo

O protótipo da proposta está ilustrado na Figura 55, onde dois equipamentos de SDR operando como um UE e uma FBS posicionados a uma certa distância. Ambos implementados com o algoritmo de sensoriamento espectral enviam relatórios das medições feitas em todos os canais através da internet a um servidor de TVWS. O

servidor, implementado com o algoritmo bayesiano, calcula os números BEED e compara os vetores dos UEs com o vetor da FBS. Finalmente decide quais canais estão ocupados e quais livres.



Fonte: Do autor.

Nesta proposta o algoritmo bayesiano pode ser implementado tanto nos dispositivos femtocelulares (FBS e UEs) quanto no servidor do banco de dados. Porém, para evitar gastar a carga limitada de bateria dos dispositivos femtocelulares, por causa do processamento e desempenho, o algoritmo bayesiano deve ser implementado no servidor de TVWS.

6.3. Processo de implementação

A Figura 56 mostra a plataforma experimental com USRP B100 e o *front-end* WBX. O cenário envolve um sistema CR que tem a capacidade de realizar a detecção de espectro em bandas de frequência distintas.





Para a criação de um entorno controlado, um programa foi desenvolvido em **GNU Radio**, que simula um canal de TV de largura de banda 6 MHz, como mostrado na Figura 57.



Figura 57 – Diagrama de blocos para um Canal de TV em GNU Radio

O sinal resultante desse programa no domínio do tempo pode ser observado na Figura 58, onde a linha azul representa a parte real e a linha vermelha representa à parte imaginaria.





Fonte: Do Autor

Fonte: Do Autor

A Figura 59 mostra o sinal no domínio da frequência, em uma gráfica de frequência versus ganho relativo. Nessa figura pode se observar a máscara espectral do sistema de TV para uma largura de banda de 6MHz.



Figura 59 – Espectro de TV no domínio da frequência

O sensoriamento espectral foi implementado mediante o programa ilustrado na Figura 60, onde é realizada a medida da potência do sinal de um canal de TV simulado.







Fonte: Do Autor

O resultado desse programa mostra a amplitude do sinal do canal analisado em um evento ou amostra, conforme ilustrado na Figura 61.

Deve-se mencionar que a amplitude mostrada é relativa aos equipamentos de SDR, a maioria de equipamentos de SDR não fornecem medidas em dBm. Para obter medidas em dBm, o SDR deve ser ainda calibrado com um dispositivo de medição externo.





Fonte: Do Autor

Em detectores de energia convencionais, a média de N amostras consideradas é comparada com um determinado nível de limiar de detecção, onde o canal é considerado como livre quando a amplitude medida é menor que o limiar de comparação, e é considerado ocupado quando é maior que o limiar. Porém, isso depende muito do número de amostras consideradas.

As figuras 62, 63 e 64 mostram a influência do número de amostras em um detector de energia convencional na decisão de ocupado/livre [98]. Cada figura possui um gráfico de tempo versus decisão, onde o canal é considerado como livre quando o resultado é 0, e é considerado ocupado quando o resultado é 1. Essas respostas binárias são mostradas ao longo do tempo da detecção.









Fonte: Do Autor

Figura 64 – Alto número de amostras.



Fonte: Do Autor

Observa-se que os resultados da decisão mudam em comparação com o número de amostras consideradas. Ao aumentar o número de amostras a decisão 1 é mais frequente ao longo do tempo. Isto ocorre por causa da incerteza do ruído e a utilização de um limiar de comparação fixo.

Por outro lado, em nossa arquitetura proposta, os resultados do sensoriamento espectral mostrado na Figura 61 devem ser processados pelo algoritmo bayesiano, que como explicado na seção 5.2.1 não utiliza um limiar de comparação e resolve os efeitos da incerteza do ruído.

Os resultados de medidas de todos os canais, conforme Figura 61, devem ser enviadas ao servidor de TVWS para que os vetores possam ser comparados, logo determinar se um canal está sendo ocupado ou não. A Figura 65 mostra o programa em **GNU Radio** que envia relatórios a um servidor de TVWS.



Figura 65 – Envio de relatórios ao servidor de TVWS em GNU Radio

Fonte: Do Autor

6.4. Conclusão

Este capítulo abordou a implementação de uma prova de conceito do sistema proposto. Foi implementado um programa em **GNU Radio** para realizar medidas de potência em uma banda de TV. Discutimos as limitações de um detector de energia baseado em limiar de comparação e as possibilidades que o algoritmo bayesiano possui para solucionar essas limitações. Também foi apresentado um programa em **GNU Radio** que envia informações ao servidor de banco de dados de TVWS por meio do protocolo TCP. Mostramos assim, que o sistema proposto no capítulo 5 pode ser facilmente desenvolvido utilizando plataformas de SDR.

Capítulo 7 Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

Foi proposto o uso de TVWS como banda de operação das femtocélulas, essa mudança tem como proposito eliminar a interferência causada à rede macrocelular. Para respaldar essa proposta, foi analisado teoricamente a possibilidade e as vantagens dessa mudança, apoiadas com medições de campo; também foi analisado mediante simulações o impacto dessa mudança no sistema de TV.

Foi encontrado que a banda de TVWS é compatível com um sistema femtocelular de 5G. Foi visto que, teoricamente, é possível alocar essa banda de frequência para femtocélulas. A faixa de um canal de TV (6MHz) seria suficiente para a operação de femtocélulas, pois a largura de banda mínima na tecnologia 5G NR é de 5 MHz.

Segundo medições de campo, foi mostrado que existe espectro desocupado em ambientes interiores, aproximadamente 126 MHz que podem ser considerados como TVWS. Além disso, foi encontrado que o espectro da banda de TV é altamente estável ao longo do tempo, o que beneficia a utilização de rádios cognitivos.

Também foram apresentadas simulações sobre a probabilidade de interferência em distintos cenários. Em co-canal, foi encontrado que é necessária uma certa distância (500m a 1 Km, segundo o caso) entre o receptor de TV e o transmissor do sistema femtocelular para evitar interferências. Em canal adjacente, quando femtocélulas operando em baixa potência (11dbm) não existe interferência significativa perto da estação de TV.

Todavia, uma nova arquitetura para a utilização de TVWS em femtocélulas foi proposta no capítulo 5, esta arquitetura permite encontrar canais de TVWS sem utilizar a localização da FBS e dos UEs. Finalmente, no capítulo 6 uma PoC da arquitetura proposta foi implementada usando equipamentos de SDR e o software **GNU Radio**, onde discutimos as vantagens do sistema proposto e mostramos que pode ser facilmente desenvolvido utilizando plataformas de SDR.

Os resultados avaliam as hipóteses que é possível a utilização de TVWS como banda de operação das femtocélulas, que existe espectro disponível nessa banda, que o impacto dessa mudança no sistema de TV é mínimo, e finalmente que a arquitetura proposta tem vantagens frente a outras arquiteturas de sensoriamento espectral no cenário estudado.

7.2. Trabalhos Futuros

Alguns trabalhos futuros são recomendados a seguir:

- Estudos de propagação de sinais em ambientes interiores;
- Estudos experimentais adicionais sobre o comportamento do espectro da banda de TV em ambientes interiores.
- Podem ser feitos estudos de comparação entre a ocupação espectral em um ambiente interior e um ambiente exterior nas mesmas coordenadas.
- Estudos do sensoriamento espectral especializado para a banda de TV no padrão ISDB-Tb;
- Adicionalmente, sugere-se testes experimentais sobre interferência entre femtocélulas operando em TVWS e o sistema de TV;
- Por outro lado, é necessário pesquisas para determinar quais dados devem entrar no banco de dados em sistemas cognitivos para que seja suficientemente eficiente.

Esses estudos permitirão conhecer melhor a banda de TV e beneficiarão a implantação de femtocélulas cognitivas em TVWS.

Referências

- [1] E. E. A. Medina, S. E. Barbin, and S. T. Kofuji, "Proposal of a System Architecture for Real Time Quality of Service Monitoring of Mobile Telephony Networks" in 2019 IEEE 1st Sustainable Cities Latin America Conference (SCLA), 26-29 Aug. 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCLA.2019.8905462.
- [2] Alcatel-Lucent, Vodafone, Simulations assumptions and parameters for FDD HeNB, RF requirements (Technical report, 3GPP TSG RAN WG4 Meeting 51). San Francisco, 2009.
- [3] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, 2008, doi: 10.1109/MCOM.2008.4623708.
- [4] Amdocs. "2015 State of the RAN."
- [5] G. HKT, Huawei, "Indoor 5G Scenario Oriented White Paper" ed, 2019.
- [6] "Multi-operator and neutral host small cells Drivers, architectures, planning and regulation," ed, 2016.
- [7] Cisco. "Cisco Vision: 5G THRIVING INDOORS Whitepaper."
- [8] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
- [9] R. Q. Hu, Y. Qian, S. Kota, and G. Giambene, "Hetnets a new paradigm for increasing cellular capacity and coverage [Guest Editorial]," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 8-9, 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.5876495.
- [10] A. Khandekar, N. Bhushan, J. Tingfang, and V. Vanghi, "LTE-Advanced: Heterogeneous networks," in 2010 European Wireless Conference (EW), 12-15 April 2010 2010, pp. 978-982, doi: 10.1109/EW.2010.5483516.
- [11] T.-T. Tran, Y. Shin, and O.-S. Shin, "Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-advanced," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2012, no. 1, p. 54, 2012/02/20 2012, doi: 10.1186/1687-1499-2012-54.
- [12] Qualcomm, "Heterogeneous Networks (HetNets) in HSPA," ed, 2012.
- [13] W. Zhang, G. Zhang, Y. Zheng, L. Xie, and C. K. Yeo, "Energy Efficiency Consideration for Indoor Femtocell Networks in TV White Spaces," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1565-1576, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2779467.
- [14] H. Claussen, L. T. W. Ho, and L. G. Samuel, "An overview of the femtocell concept," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 221-245, 2008, doi: 10.1002/bltj.20292.
- [15] H. O. Kpojime and G. A. Safdar, "Interference Mitigation in Cognitive-Radio-Based Femtocells," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1511-1534, 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2361687.
- [16] T. Zahir, K. Arshad, A. Nakata, and K. Moessner, "Interference Management in Femtocells," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 293-311, 2013.
- [17] R. Raheem, A. Lasebae, M. Aiash, and J. Loo, "Interference Management for Co-channel Mobile Femtocells Technology in LTE Networks," in 2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE), 14-16 Sept. 2016 2016, pp. 80-87, doi: 10.1109/IE.2016.21.

- [18] S. Cheng, S. Lien, F. Chu, and K. Chen, "On exploiting cognitive radio to mitigate interference in macro/femto heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 40-47, 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.5876499.
- [19] W. O. d. C. Gustavo, F. C. Andrea, V. Á. Roig, and E. M. Preben, "Interference mitigation in cognitive femtocells," in 2010 IEEE Globecom Workshops, 6-10 Dec. 2010 2010, pp. 721-725, doi: 10.1109/GLOCOMW.2010.5700417.
- [20] K. Mohamed, M. Y. Alias, and R. Mardeni, "Review on Femto-cell Networks Interference Management Techniques," International Journal of Engineering and Technology, vol. 10, pp. 1248-1262, 08/30 2018, doi: 10.21817/ijet/2018/v10i4/181004078.
- [21] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, and D. I. Kim, "Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 86-95, 2012, doi: 10.1109/MWC.2012.6231163.
- [22] M. Nekovee, "Quantifying the Availability of TV White Spaces for Cognitive Radio Operation in the UK," in 2009 IEEE International Conference on Communications Workshops, 14-18 June 2009 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCW.2009.5208035.
- [23] Ofcom, "Statement on Cognitive Access to Interleaved Spectrum," ed, July, 2009.
- [24] E. G. Larsson and M. Skoglund, "Cognitive radio in a frequency-planned environment: some basic limits," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 4800-4806, 2008, doi: 10.1109/T-WC.2008.070928.
- [25] C. Federal Communications, "Unlicensed operation in the TV broadcast bands, third memorandum opinion and order," *FCC. 12,* vol. 36, 2012.
- [26] ETSI TS 138 104 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.8.0 Release 15), ETSI, 2020.
- [27] ETSI TS 138 101 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.8.2 Release 15), ETSI, 2020.
- [28] D. V. B. Sb, "Study on specification and use of in-line filters to reduce interference in broadcast bands from mobile base stations," *DVB White Paper*, 2014.
- [29] M. Fuentes, C. Garcia-Pardo, E. Garro, D. Gomez-Barquero, and N. Cardona, "Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 63-69, 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.7000973.
- [30] E. E. A. Medina and S. E. Barbin, "Using Femtocells in TV White Space: Overview and Challenges," in 2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018), 12-14 Dec. 2018 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAMC.2018.8699022.
- [31] M. Series, "IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," *Recommendation ITU*, vol. 2083, 2015.
- [32] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.

- [33] S. Chen and J. Zhao, "The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 36-43, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815891.
- [34] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, Second Edition ed. Wiley Publishing, 2011.
- [35] H. Claussen, "Performance of Macro- and Co-Channel Femtocells in a Hierarchical Cell Structure," in 2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 3-7 Sept. 2007 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2007.4394515.
- [36] J. Chen, P. Rauber, D. Singh, C. Sundarraman, P. Tinnakornsrisuphap, and M. Yavuz, **"Femtocells Architecture & Network Aspects,"** 01/01 2010.
- [37] D. T. Ngo, D. H. N. Nguyen, and T. Le-Ngoc, "Chapter 6 Intercell Interference Coordination: Towards a Greener Cellular Network," in Handbook of Green Information and Communication Systems, M. S. Obaidat, A. Anpalagan, and I. Woungang Eds.: Academic Press, 2013, pp. 147-182.
- [38] M. Tamilarasi and P. Sambanthan, *Technical challenges in femtocell network*. 2013, pp. 679-684.
- [39] S. A. Mahmud, G. M. Khan, M. Zafar, K. Ahmad, and N. Behttani, "A Survey on Femtocells: Benefits Deployment Models and Proposed Solutions," *Journal of applied research and technology*, vol. 11, pp. 733-754, 10/01 2013, doi: 10.1016/S1665-6423(13)71582-7.
- [40] L. Poongup, L. Taeyoung, J. Jangkeun, and S. Jitae, "Interference management in LTE femtocell systems using Fractional Frequency Reuse," in 2010 The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 7-10 Feb. 2010 2010, vol. 2, pp. 1047-1051.
- [41] M. S. Jin, S. A. Chae, and D. I. Kim, "Per Cluster Based Opportunistic Power Control for Heterogeneous Networks," in 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 15-18 May 2011 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2011.5956307.
- [42] Y. Zhang, Y. Y. Li, E. S. Sousa, and Q. Zhang, "Pilot Power Minimization in HSDPA Femtocells," in 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010, 6-10 Dec. 2010 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683281.
- [43] M. Yavuz et al., "Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells," IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp. 102-109, 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5277462.
- [44] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 8, pp. 4316-4328, 2009, doi: 10.1109/TWC.2009.081386.
- [45] H. Jo, C. Mun, J. Moon, and J. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 8, no. 10, pp. 4906-4910, 2009, doi: 10.1109/TWC.2009.080457.
- [46] M. E. Sahin, I. Guvenc, M. Jeong, and H. Arslan, "Handling CCI and ICI in OFDMA femtocell networks through frequency scheduling," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 4, pp. 1936-1944, 2009, doi: 10.1109/TCE.2009.5373753.

- [47] L. Zhang, L. Yang, and T. Yang, "Cognitive Interference Management for LTE-A Femtocells with Distributed Carrier Selection," in 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall, 6-9 Sept. 2010 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECF.2010.5594585.
- [48] F. Peng, N. Wang, Y. Gao, L. Cuthbert, and X. Zhang, "Geo-location database based TV white space for interference mitigation in LTE femtocell networks," in 2013 IEEE 14th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM), 4-7 June 2013 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/WoWMoM.2013.6583459.
- [49] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999, doi: 10.1109/98.788210.
- [50] N. Van Tam, F. Villain, and Y. L. Guillou, "Cognitive radio systems: Overview and challenges," in 2011 3rd International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST), 27-30 Sept. 2011 2011, pp. 497-502, doi: 10.1109/ICAwST.2011.6163179.
- [51] ITU-R, "Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)," in *Report SM.2152* vol. SM Series, ed, 2009.
- [52] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 40-48, 2008, doi: 10.1109/MCOM.2008.4481339.
- [53] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, 2005, doi: 10.1109/JSAC.2004.839380.
- [54] M. Zareei, A. K. M. M. Islam, S. Baharun, C. Vargas-Rosales, L. Azpilicueta, and N. Mansoor, "Medium Access Control Protocols for Cognitive Radio Ad Hoc Networks: A Survey," Sensors, vol. 17, no. 9, 2017, doi: 10.3390/s17092136.
- [55] F. Peng, "Integration of TV white space and femtocell networks," 2013.
- [56] E. Medina, "Sensoriamento espectral baseado na detecção de energia para rádios cognitivos," Universidade de São Paulo, 2014.
- [57] M. Lopez-Benitez, A. Umbert, and F. Casadevall, "Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications," in VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference, 26-29 April 2009 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2009.5073544.
- [58] T. M. Taher, R. B. Bacchus, K. J. Zdunek, and D. A. Roberson, "Long-term spectral occupancy findings in Chicago," in 2011 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 3-6 May 2011 2011, pp. 100-107, doi: 10.1109/DYSPAN.2011.5936195.
- [59] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and S. Sai, "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios," in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005.*, 8-11 Nov. 2005 2005, pp. 328-337, doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542649.
- [60] C. Sum et al., "Cognitive communication in TV white spaces: An overview of regulations, standards, and technology [Accepted From Open Call]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 7, pp. 138-145, 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6553690.
- [61] E. TC48-TG, "MAC and PHY for Operation in TV White Space," *ECMA 1stDraft Standard,* 2009.

- [62] M. Mueck et al., "ETSI reconfigurable radio systems: status and future directions on software defined radio and cognitive radio standards," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 9, pp. 78-86, 2010, doi: 10.1109/MCOM.2010.5560591.
- [63] W. Zhang, J. Yang, G. Zhang, L. Yang, and C. K. Yeo, "TV white space and its applications in future wireless networks and communications: a survey," *IET Communications*, vol. 12, no. 20, pp. 2521-2532, 2018, doi: 10.1049/iet-com.2018.5009.
- [64] C. O. M. Resolution, "20 (WRC-15). Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion (s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond. Provisional Final Acts World Radiocommunication Conference (WRC-15)," International Telecommunications Union (ITU). Geneva, pp. 424-426, 2015.
- [65] G. Martínez-Pinzón, N. Cardona, C. Garcia-Pardo, A. Fornés-Leal, and J. A. Ribadeneira-Ramírez, "Spectrum Sharing for LTE-A and DTT: Field Trials of an Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 Service Area," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 3, pp. 552-561, 2016, doi: 10.1109/TBC.2016.2582338.
- [66] E. C. C. Ecc, "Report 224: Long Term Vision for the UHF broadcasting band," ed: November, 2014.
- [67] J. Robinson, M. Singh, R. Swaminathan, and E. Knightly, "Deploying Mesh Nodes under Non-Uniform Propagation," in 2010 Proceedings IEEE INFOCOM, 14-19 March 2010 2010, pp. 1-9, doi: 10.1109/INFCOM.2010.5462038.
- [68] F. Peng, Y. Gao, Y. Chen, K. K. Chai, and L. Cuthbert, "Using TV White Space for interference mitigation in LTE Femtocell Networks," in *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, 14-16 Oct. 2011 2011, pp. 5-9, doi: 10.1049/cp.2011.0619.
- [69] F. L. Martin, N. S. Correal, R. L. Ekl, P. Gorday, and R. O. Dea, "Early Opportunities for Commercialization of TV Whitespace in the U.S," in 2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), 15-17 May 2008 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562539.
- [70] W. Zhang, L. Xie, and Y. C. Kiat, "Capacity consideration for indoor femtocell networks in TV white spaces," in 2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 26-28 April 2017 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/WTS.2017.7943530.
- [71] Z. Zhao, M. Schellmann, H. Boulaaba, and E. Schulz, "Interference study for cognitive LTE-femtocell in TV white spaces," in *2011 Technical Symposium at ITU Telecom World (ITU WT)*, 24-27 Oct. 2011 2011, pp. 153-158.
- [72] L. Xiaoming, G. Caili, L. Dongming, F. Chunyan, and G. Yuting, "A databaseassisted spectrum aggregation algorithm in TV White Spaces for Femtocells," in 2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 24-27 June 2013 2013, pp. 1-5.
- [73] Y. Wang, Y. Zhang, Y. Chen, and R. Wei, "Energy-efficient design of twotier femtocell networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, 02/24 2015, doi: 10.1186/s13638-015-0242-4.

- [74] Norma Brasileira **ABNT NBR 15604: Televisão digital terrestre Receptores**, ABNT, Dezembro de 2007.
- [75] J. Van de Beek, J. Riihijarvi, A. Achtzehn, and P. Mahonen, "UHF white space in Europe—a quantitative study into the potential of the 470–790 MHz band," 2011: IEEE, pp. 1-9.
- [76] D. Makris, G. Gardikis, and A. Kourtis, "Quantifying TV White Space Capacity: A Geolocation-Based Approach," IEEE Communications Magazine, vol. 50, 09/01 2012.
- [77] C. Kurnaz, B. K. Engiz, and Z. E. Albayrak, "Determination of TV white space spectrum availability in Samsun Turkey," in 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR), 22-23 Nov. 2016 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2016.7818747.
- P. Maiti and D. Mitra, "Explore TV White Space for indoor small cells [78] deployment and practical pathloss measurement," in 2017 International on Innovations in Electronics, Conference Signal Processing and Communication (IESC), 6-7 April 2017 2017, pp. 79-84, doi: 10.1109/IESPC.2017.8071869.
- [79] D. Kim, S. Oh, and J. Woo, "Coexistence analysis between IMT system and DTV system in the 700MHz band," in 2012 International Conference on ICT Convergence (ICTC), 15-17 Oct. 2012 2012, pp. 284-288, doi: 10.1109/ICTC.2012.6386840.
- [80] A. N. d. T.-. ANATEL, "Relatório de Teste Laboratorial de Interferência do LTE na faixa de 700 MHz no ISDB-T," 2014. Accessed: Acesso em 19 Fevereiro de 2020. [Online]. Available: https://www.anatel.gov.br
- [81] ANATEL, "Resolução nº 398, de 7 de abril de 2005,"
- [82] Norma Brasileira ABNT NBR 15601: Televisão digital terrestre Sistema de transmissão, ABNT, Abril de 2008.
- [83] E. E. A. Medina and S. E. Barbin, "Spectrum Sensing for ISDB-TB Systems with Cognitive Radio," in 2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018), 12-14 Dec. 2018 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/LAMC.2018.8699019.
- [84] S. T. Girma, D. B. O. Konditi, and C. Maina, "Frequency re-use distance calculation in cellular systems based on Monte-Carlo simulation," *Heliyon*, vol. 5, no. 3, p. e01302doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01302.
- [85] CEPT, **SEAMCAT Handbook**, 3 ed. 2016.
- [86] D. M. Okamoto, "Análise da Coexistência entre TV Digital e LTE na Faixa de 700 MHz Medidas e Simulações," PUC-Rio, 2016.
- [87] Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz, ITU, 08/2019.
- [88] S. J. Shellhammer, "A Comparison of Geo-Location and Spectrum Sensing in Cognitive Radio," in 2009 Proceedings of 18th International Conference on Computer Communications and Networks, 3-6 Aug. 2009 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCN.2009.5235307.
- [89] K. H. Anabi, R. Nordin, and N. F. Abdullah, "Database-Assisted Television White Space Technology: Challenges, Trends and Future Research Directions," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 8162-8183, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2621178.
- [90] S. K. Jones, T. W. Phillips, H. L. V. Tuyl, and R. D. Weller, "Evaluation of the performance of prototype TV-band white space devices phase II," *FCC: Washington, DC, USA,* 2008.

- [91] M. Caleffi and A. S. Cacciapuoti, "Database access strategy for TV White Space cognitive radio networks," in 2014 Eleventh Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking Workshops (SECON Workshops), 30 June-3 July 2014 2014, pp. 34-38, doi: 10.1109/SECONW.2014.6979702.
- [92] H. B. Yilmaz, T. Tugcu, F. Alagöz, and S. Bayhan, "Radio environment map as enabler for practical cognitive radio networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 162-169, 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6685772.
- [93] Z. Wei, Q. Zhang, Z. Feng, W. Li, and T. A. Gulliver, "On the construction of Radio Environment Maps for Cognitive Radio Networks," in 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 7-10 April 2013 2013, pp. 4504-4509, doi: 10.1109/WCNC.2013.6555304.
- [94] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568-2599, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2911558.
- [95] M. Grissa, B. Hamdaoui, and A. A. Yavuz, "Location Privacy in Cognitive Radio Networks: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 3, pp. 1726-1760, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2693965.
- [96] J. Shen, L. S. L. Liu, Y. Wang, G. Xie, H. F. Rashvand, and Y. Liu, "Robust Energy Detection in Cognitive Radio," *Communications, IET,* vol. 3, pp. 1016-1023, 07/01 2009, doi: 10.1049/iet-com.2008.0107.
- [97] E. E. A. Medina and S. E. Barbin, "Performance of Spectrum Sensing Based on Energy Detection for Cognitive Radios," in 2018 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 10-14 Sept. 2018 2018, pp. 948-951, doi: 10.1109/APWC.2018.8503791.
- [98] E. E. A. Medina and S. E. Barbin, **"A Study of Spectrum Sensing Using an Experimental Platform for Cognitive Radios,"** in *2018 IEEE ANDESCON*, 22-24 Aug. 2018 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564689.