

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Análise da Coexistência entre Sistemas 5G e Serviços
Fixos na Faixa de Ondas Milimétricas**

Fátima Priscila Araújo Teixeira

DM 32/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Fátima Priscila Araújo Teixeira

**Análise da Coexistência entre Sistemas 5G e Serviços
Fixos na Faixa de Ondas Milimétricas**

DM 32/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Fátima Priscila Araújo Teixeira

**Análise da Coexistência entre Sistemas 5G e Serviços
Fixos na Faixa de Ondas Milimétricas**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, ênfase em Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA COEXISTÊNCIA ENTRE SISTEMAS 5G E SERVIÇOS FIXOS
NA FAIXA DE ONDAS MILIMÉTRICAS**

AUTORA: FÁTIMA PRISCILA ARAÚJO TEIXEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 07/10/2019

BANCA EXAMINADORA:

.....
Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa (ORIENTADOR - UFPA)

.....
Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros (AVALIADOR INTERNO - UFPA)

.....
Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante (AVALIADOR INTERNO - UFPA)

.....
**Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro (AVALIADOR EXTERNO -
UFPA/CASTANHAL)**

VISTO:

.....
Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
COORDENADORA DO PPGEE/ITEC/UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A658a Araújo Teixeira, Fátima Priscila
Análise da Coexistência entre Sistemas 5G e Serviços Fixos na
Faixa de Ondas Milimétricas / Fátima Priscila Araújo Teixeira. —
2019.
69 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque
Costa
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal
do Pará, Belém, 2019.

1. Sistemas 5G. 2. Coexistência. 3. Interferência co-canal. I.
Título.

CDD 621.3

Agradecimentos

Aos meus pais, Margareth e Pedro, e à minha avó, Teodora, que sempre estiveram ao meu lado e foram as maiores incentivadoras da minha educação.

Aos meus irmãos, Maicon, Paula, Pedro e Patrícia, pela compreensão nos momentos de ausência que causei e por acreditarem no meu sonho e que me deram forças todos os dias ao longo deste mestrado.

À professora, Lilian Coelho Freitas, pelo apoio, competência, dedicação e conhecimento compartilhado para a construção deste trabalho.

Ao meu orientador, João Crisóstomo Costa, pela orientação, pelo apoio constante durante o mestrado e por sempre acreditar no meu potencial. Muito obrigada por me motivar a continuar nesta jornada até o final.

Aos meus amigos, pelas palavras de apoio, conselhos e incentivos que recebi durante este período.

À todos os amigos do laboratório LEA, em especial, Liane Barbosa, Reginaldo Santos, Décio Mathe, Aline Ohashi e Victor Rodrigues, pela companhia diária no laboratório, cujo apoio, conselhos e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

“A vida em todas as manifestações é uma sucessão de testes e exames a que são submetidos os aprendizes da evolução.”

- Joanna de Ângelis

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo analisar o impacto de interferência que um sistema 5G possa causar em um sistema legado de serviço fixo ponto-a-ponto na faixa de 26 GHz e, dessa forma, obter uma distância de proteção mínima para que o sistema fixo não seja afetado pelo sistema 5G. Para obtenção destes resultados, foram realizadas simulações utilizando o método de Monte Carlo. Foram avaliados o impacto da interferência co-canal da rede 5G sobre o serviço fixo, considerando diferentes parâmetros, como altura de antenas fixa, número de células, ganho de antena fixa e número de usuários. Nos resultados obtidos, a topologia de rede tri-setorizada de 7 células, combinada com altura de antena fixa de 60 m, foi a que apresentou o maior impacto na distância de proteção necessária, enquanto outros parâmetros como ganho e potência tiveram impacto moderado. Estes resultados implicam que a coexistência será possível quando todos os parâmetros apropriados forem aferidos para cada caso em questão. Outra contribuição desta dissertação é a disponibilização de um modelo de coexistência no simulador SEAMCAT, que possa auxiliar novos cenários para análise de coexistência.

PALAVRAS-CHAVES: Sistemas 5G, Coexistência, Interferência co-canal.

Abstract

This work aims to analyze the impact of interference of a 5G system over a legacy 26 GHz fixed point-to-point system and, thus, obtain a minimum protection distance for the fixed system not be affected by the 5G system. To obtain these results, simulations were performed using the Monte Carlo method. The impact of 5G network co-channel interference on the fixed service was evaluated considering different parameters such as fixed antenna height, cell number, fixed antenna gain and number of users. In the results obtained, the 7-cell tri-sector network topology, combined with a 60 m of fixed antenna height, had the greatest impact on the required protection distance, while other parameters such as gain and power had a moderate impact. These results imply that coexistence will be possible when all appropriate parameters are measured for each case in question. Another contribution of this dissertation is the availability of a coexistence model in the SEAMCAT simulator, which can help new scenarios for coexistence analysis.

KEYWORDS: 5G Systems, coexistence, co-channel interference.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Glossário	vi
1 Introdução	1
1.1 Contexto do Trabalho	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Trabalhos Relacionados	3
1.5 Estrutura do Trabalho	5
2 Redes 5G no Espectro de Ondas Milimétricas	6
2.1 Introdução	6
2.2 Redes 5G	6
2.2.1 Cenários de uso previstos para 5G	8
2.2.2 Principais requisitos do 5G	11
2.2.3 Tecnologia de acesso <i>5G New Radio</i>	13
2.3 Faixas de Ondas Milimétricas	14
2.3.1 Principais vantagens de uso	15
2.3.2 Perdas de propagação	15
2.3.3 Situação atual do espectro de ondas milimétricas	18
2.3.4 Uso das faixas milimétricas no Brasil	19
3 Cálculo da relação Interferência/Ruído - Abordagem da ferramenta	

SEAMCAT	21
3.1 Funcionamento	21
3.2 Método de Monte Carlo aplicado ao SEAMCAT	23
3.3 Cálculo de interferência no simulador	24
3.4 Arquitetura	26
3.4.1 Mecanismo de geração de eventos - EGE	26
3.4.2 Mecanismo de cálculo de interferência - ICE	27
3.5 Aplicações	27
4 Cenários de Análise	28
4.1 Introdução	28
4.2 Configuração das redes	28
4.2.1 Rede FS	29
4.2.2 Rede 5G	30
4.3 Modelos de Propagação	30
4.4 Análise de coexistência	32
5 Resultados	36
5.1 Introdução	36
5.2 Validação das simulações no SEAMCAT	36
5.3 Impacto da variação de potência	39
5.4 Impacto da variação do número de células 5G e setores	40
5.5 Impacto da variação do ganho de antenas FS	42
5.6 Impacto da variação do número de usuários	44
5.7 Conclusão	44
6 Conclusões	47
Publicação Oriunda da Pesquisa	49
Referências	50
Anexos	55

Lista de Figuras

2.1	Comparação de características entre 4G e 5G. Fonte: adaptada de [1].	7
2.2	Faixas prioritárias para o 5G em diversos países. Fonte: adaptada de [2].	8
2.3	Mapeamento de casos de uso do 5G dentro de cenários de uso. Fonte: [3].	10
2.4	Elementos de IoT. Fonte: [3].	10
2.5	Média de absorção atmosférica nas faixas de ondas milimétricas. Fonte: [4].	17
3.1	Interface gráfica do SEAMCAT.	22
3.2	Cenário típico de interferência de um evento de simulação de Monte Carlo [5].	23
3.3	Níveis de sinais utilizados para determinar quando há interferências [6].	24
3.4	Arquitetura do SEAMCAT.	26
4.1	Diagrama de radiação ITU-R F.699 para ganhos de (a) 36,6 dBi e (b) 42 dBi.	30
4.2	Diagrama de radiação de <i>beamforming</i> . (a) ganho de 23 dBi na BS. (b) ganho de 17 dBi no UE.	32
4.3	Cenário de coexistência entre única célula 5G e um FS ponto-a-ponto em <i>downlink</i> [7].	34
4.4	Topologia de 7 células 5G com único setor e sistema FS ponto-a-ponto.	34
4.5	Topologia de 7 células 5G com 3 setores cada.	34
4.6	Estrutura de uma célula com 3 setores. Fonte: [8].	35
5.1	Gráfico comparativo entre os resultados obtidos pelo estudo e os resultados obtidos pelo SEAMCAT em cenário <i>downlink</i>	37
5.2	Comparativo entre os resultados da variação de ganhos obtidos pelo estudo da ECC e os resultados obtidos pelo SEAMCAT em cenário <i>downlink</i>	38

5.3	Comparativo entre os resultados estudo da ECC para <i>uplink</i> com os obtidos pelo SEAMCAT.	38
5.4	Efeito de potência de transmissão da BS 5G sobre a distância de proteção em cenário <i>downlink</i>	39
5.5	Efeitos de diferentes topologias de redes 5G sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 15 m em cenário <i>downlink</i>	40
5.6	Efeitos de diferentes topologias de redes 5G sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 30 m em cenário <i>downlink</i>	41
5.7	Efeitos de diferentes topologias de redes 5G sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 60 m em cenário <i>downlink</i>	41
5.8	Efeitos do ganho de antena FS sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 15 m.	42
5.9	Efeitos do ganho de antena FS sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 30 m.	43
5.10	Efeitos do ganho de antena FS sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 60 m.	43
5.11	Comparativo do impacto de interferência com número mínimo e máximo de usuários por célula em cenário <i>uplink</i>	44

Lista de Tabelas

2.1	Serviços em operação no Brasil na banda de ondas milimétricas candidatas ao IMT-2020.	20
4.1	Parâmetros de configuração da rede FS.	29
4.2	Parâmetros de configuração para rede 5G.	31
4.3	Parâmetros utilizados nos modelos propagação ITU-R P.452-16 e P.2108-0. . .	33
5.1	Resumo dos resultados.	46

Glossário

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G NR	<i>5G New Radio</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	<i>Base Station</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
dRSS	<i>desired Received Signal Strength</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FS	<i>Fixed Services</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ILT	<i>Interfering Link Transmitter</i>
ILR	<i>Interfering Link Receiver</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
iRSS	<i>interfering Received Signal Strength</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>

MCL	<i>Minimum Coupling Loss</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAT	Tecnologia de Acesso por Rádio
RLC	<i>Radio Link Control</i>
SEAMCAT	<i>Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool</i>
UE	<i>User equipment</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communication</i>
VLT	<i>Victim Link Transmitter</i>
VLR	<i>Victim Link Receiver</i>
WRC	<i>World Radiocommunication Conference</i>

Introdução

1.1 Contexto do Trabalho

O desenvolvimento das tecnologias de comunicações móveis está ligado diretamente à evolução tecnológica de dispositivos pessoais, que produziu equipamentos com maior capacidade de processamento e menor custo, tornando-os acessíveis a uma grande parcela da população. Com o aumento no número de usuários, combinado com o surgimento de novos serviços *online*, observou-se um crescimento no tráfego de acesso móvel. Nesse contexto, surgem as Redes Móveis de 5ª Geração (5G). As redes 5G prometem revolucionar a forma de comunicação e uso das redes móveis. O surgimento destas redes têm como intuito permitir uma sociedade conectada, reunindo pessoas, dispositivos, dados, aplicações, sistemas de transporte e cidades em um ambiente de comunicação em rede inteligente [9]. A estimativa é que as redes comecem a operar a partir do ano de 2020, trazendo uma disruptura nos sistemas de comunicação de banda larga móvel, ao atender requisitos desafiadores, como: taxa de dados de 10 Gbps, densidade de conexão de 1 milhão de conexões por km², densidade de volume de tráfego de 10 terabytes por segundo por km², mobilidade maior que 500 km/h, latência na ordem de milissegundos, entre outros [10].

A fim de que se obtenha o maior desempenho das redes 5G para atender a esses requisitos, será necessário licenciar novas faixas de frequências para uso do 5G. Parte do espectro de radiofrequência que apresenta melhores características de propagação, principalmente as faixas de frequências mais baixas, encontram-se fracionadas para diversos tipos de serviços, como: rádio, TV digital, telefonia móvel e serviços de dados móveis (2G, 3G e 4G). Estes serviços possuem exclusividade de uso destas faixas, dificultando a implantação de novos serviços do 5G em várias partes do mundo.

Instituições reguladoras de telecomunicações ao redor do mundo, como a *Federal Communications Commission* (FCC) [11] e a *International Telecommunication Union*

(ITU) [12] têm investigado a viabilidade do uso das frequências de ondas milimétricas (faixas de 30 GHz a 300 GHz) para as redes 5G. Esse espectro caracteriza-se por ter curto alcance e maior atenuação por fatores atmosféricos (chuva, gases, etc.) e por obstáculos. Por outro lado, há inúmeras razões para utilização de bandas de frequências mais altas, como as indicadas na resolução 238 da *World Radiocommunication Conference* (WRC) [13], por exemplo: não há bandas disponíveis abaixo de 10 GHz para as redes 5G [14]. Além disso, blocos de espectro contínuo em altas frequências podem suportar aplicações de taxa muito alta e acomodar comunicações de latência ultrabaixa [14, 15]. Ademais, essas bandas têm um comprimento de onda menor, o que pode permitir tecnologia avançada de antenas, como técnicas de *beamforming* e tecnologia *multiple-input multiple-output* (MIMO) para otimizar a eficiência espectral [16].

Contudo, a maior preocupação das empresas de tecnologia é como realizar a implementação desse novo serviço móvel em uma banda de frequência em que outro serviço já se encontra estabelecido, de maneira que a interferência de uma rede não prejudique o funcionamento de outra. Neste contexto, o presente trabalho estuda a interferência de uma rede 5G sobre uma rede de serviços fixos (do inglês *Fixed service* - FS) ponto-a-ponto na faixa de 26 GHz.

1.2 Justificativa

Acrescentar um novo serviço ao espectro de frequências mais baixas (700 MHz a 6 GHz), com melhores condições de propagação e altamente saturado, sem que haja um comprometimento dos serviços existentes, pode se tornar uma tarefa complexa, uma vez que será necessário técnicas de acesso dinâmico ao espectro. Isso exigirá um processamento mais robusto e, conseqüentemente, tornará o sistema a ser implementado mais caro. A migração para faixas de ondas milimétricas é uma das opções para contornar este problema. Dessa forma, o estudo de coexistência entre redes 5G e FS na faixa de 26 GHz se justifica, por tratar de aspectos atuais e relevantes à pesquisa sobre o impacto da interferência das redes 5G sobre outros serviços. Especificamente, o estudo de coexistência na faixa de 26 GHz ocorreu devido a recomendação da ITU *Radiocommunication Sector* (ITU-R), em razão da possibilidade de compartilhamento dessa faixa de frequência, por meio da adoção de distância de proteção (distância mínima entre dois sistemas, na qual um sistema não esteja interferindo em outro), de acordo com o item 1.13 da resolução 238 da WRC de 2015 (WRC-15) [13]. No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) também tem demonstrado interesse em incluir a frequência de 26 GHz no leilão para uso da tecnologia de 5G, previsto para 2020 [17].

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da interferência co-canal de redes 5G sobre redes FS legados na faixa de 26 GHz, de modo a identificar a distância de proteção mínima necessária para garantir coexistência entre essas redes a partir da relação sinal-ruído (do inglês *Interference to noise - I/N*). Como objetivos específicos, destacam-se:

- Estudar as condições de uso atual das faixas de ondas milimétricas e suas principais características, com ênfase no cenário brasileiro. A faixa de frequência de 26 GHz é a principal candidata ao uso de 5G no Brasil.
- Avaliar o impacto da interferência de um novo serviço 5G sobre um FS ponto-a-ponto, quando ambos estiverem operando na mesma faixa de frequência. Os sistemas FS são os serviços predominantes nas faixas de ondas milimétricas no Brasil.
- Determinar os parâmetros de sistemas que melhor asseguram a coexistência entre serviços de redes heterogêneas.

1.4 Trabalhos Relacionados

A análise de coexistência não se trata de um questão recente trazida pela tecnologia 5G. Em versões anteriores das tecnologias de comunicações, também realizados estudos de coexistência, já prevendo os eventuais problemas que novos serviços poderiam enfrentar diante da escassez de espectro que poderiam ser alocados a estes novos serviços.

Em [18] e [19], são feitos estudos de coexistência entre sistemas LTE e TV digital na faixa de 700 MHz, que se classifica como faixa do dividendo digital, ou faixas liberadas após a alocação da TV analógica. Em ambos os estudos, por meio de medições e simulações, foi possível avaliar a quantidade de degradação que um sistema causou a outro, podendo assim, estabelecer os melhores critérios para coexistência.

Em estudos voltados para coexistência com redes 5G, no estudo [14], foi realizado um estudo de diversos cenários de coexistência entre redes 5G e FS na faixa de 28 GHz. Os resultados mostraram que o FS será severamente afetado pela transição do sistema 5G na faixa de 28 GHz na Malásia, especialmente no cenário de *downlink*.

Em [15] realizou-se uma análise de cenários de coexistência entre redes 5G e serviços legados nas faixas de 28 GHz e 70 GHz, considerando a coexistência com FS por satélite

e com um FS sem fio, respectivamente. Realizou-se testes de coexistência em relação a distância de proteção entre as duas redes em cenários *indoor* e *outdoor*, com a conclusão que a interferência 5G sobre o FS é mais significativa do que a interferência do FS sobre o 5G, propondo mecanismos a nível de *hardware* que mitiguem esta interferência.

Em [16] e [20] são realizadas considerações sobre as condições de uso das ondas milimétricas para implantação de comunicação 5G, por exemplo, requisitos de canal e vantagem do uso de tais faixas de frequência. Nesses trabalhos, também é discutido que embora essa faixa de frequência apresente maior disponibilidade de espectro, o desenvolvimento de redes celulares nessas frequências enfrenta alguns obstáculos. Além das perdas por percurso na atmosfera terrestre, há fatores que atuam diretamente nas faixas de frequência mais altas, como atenuação por gases ou chuvas. Em [16] é mostrado que o aumento na perda de percurso omnidirecional pode ser compensado através de transmissões direcionais e de *beamforming* adequadas, por outro lado, os sinais em ondas milimétricas podem ser vulneráveis ao sombreamento. O consumo de energia do dispositivo para suportar um grande número de antenas com larguras de banda muito grandes também é um desafio.

Em [7] e [21], são feitos estudos de coexistência na faixa de 26 GHz entre redes 5G e FS ponto-a-ponto, fazendo uma análise de interferência de co-canal e adjacente com único interferente/vítima, em cenários de *downlink* e *uplink*. No primeiro estudo, é avaliado como o diferentes níveis de ganhos da antena de um FS afeta a recepção do sinal interferente no receptor vítima. Em [7], o estudo apresenta uma complementação do estudo de [21], avaliando o nível de interferência considerando novos parâmetros de sistema. Os resultados obtidos em ambos estudos apresentam como comportamento da interferência é dependente dos parâmetros que são utilizados. Com isso, é possível planejar uma distância de proteção segura para o funcionamento entre os sistemas 5G e de FS.

Os estudos descritos nos parágrafos anteriores apresentaram abordagens analíticas e/ou paramétricas simplificadas de coexistência entre sistemas 5G e outros serviços. Estas análises são convenientes para se criar um planejamento inicial de implementação das redes 5G, como requisitos mínimos de operação porém, estes cenários não refletem os verdadeiros desafios encarados para implementações de sistemas 5G, pois a simplificação pode produzir uma avaliação de interferência bruta e estática, que pode gerar resultados tendenciosos. Também há uma certa dificuldade em realizar comparação de resultados com os obtidos na literatura, especialmente para sistemas 5G, pois como se trata de um sistema ainda em desenvolvimento e muitos dos parâmetros em questão variam a cada estudo ou não são considerados. Como esta tecnologia focará principalmente no número massivo de usuários e serviços, na faixa de ondas milimétricas, uma análise mais realística de ambiente de coexistência seria necessária considerando a natureza aleatória dos operadores avaliados, realizando uma investigação de

novas configurações e topologias de sistemas 5G e FS. Por este motivo, caracteriza a relevância deste trabalho.

1.5 Estrutura do Trabalho

Para melhor descrição, o restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: Capítulo 2 discute aspectos relevantes das redes 5G e do espectro de ondas milimétricas; Capítulo 3 apresenta os elementos da ferramenta SEAMCAT e do cálculo da relação Interferência/Ruído; Capítulo 4 apresenta os cenários de análise; Capítulo 4 mostra os resultados obtidos nas simulações; Capítulo 5 apresenta uma discussão sobre os resultados obtidos nas simulações; Por fim, no Capítulo 6 apresenta-se as conclusões deste trabalho e alguns tópicos para trabalhos futuros.

Redes 5G no Espectro de Ondas Milimétricas

2.1 Introdução

Neste capítulo, serão abordados os principais aspectos da implementação das redes 5G nas faixas de ondas milimétricas. Dentre esses, algumas particularidades com relação aos avanços desta tecnologia móvel e aos requisitos de operação dessa rede. Além disso, este capítulo abordará a organização do espectro de ondas milimétricas no Brasil e sua atual situação de uso.

2.2 Redes 5G

Em 2012, a ITU-R *Working Party* começou a elaborar o desenvolvimento do *International Mobile Telecommunications for 2020* (IMT-2020), o qual é o padrão que estabelece os requisitos do ITU-R para redes, dispositivos e serviços, com o objetivo de reunir os elementos necessários para auxiliar as pesquisas sobre o 5G [13]. Os primeiros esboços e objetivos desta tecnologia estão definidos na Recomendação ITU-R M.2083 [22]. O IMT-2020 encontra-se em fase de estudo e desenvolvimento em boa parte do mundo, com previsão de operação a partir do ano de 2020, e pretende revolucionar a forma de conectar indivíduos, dispositivos eletrônicos e serviços.

A busca por altas taxas de dados impulsionou o desenvolvimento das redes móveis a partir das redes de 3^a geração (3G). Na quarta geração, o 4G *Long-Term Evolution* (LTE) trouxe resultados de desempenho superiores ao 3G, principalmente em relação à taxa de dados, porém, não foram suficiente para lidar com questões relacionadas a latência [1]. Embora haja

uma falsa impressão que a velocidade seja a característica mais importante a ser melhorada nas tecnologias futuras, a redução da latência se tornará um dos principais focos de estudos, uma vez que a tendência é o surgimento de serviços que exigem aplicações em tempo real, e que necessitem de tempo de resposta quase imediato. Neste aspecto, o 5G apresenta propostas mais ambiciosas, principalmente em relação as características como flexibilidade, escalabilidade e confiabilidade, superando as tecnologias antecessoras em diversos atributos, porém, não se espera que o 5G substitua estas tecnologias, mas que todas possam trabalhar em conjunto, de forma a contribuir para que os serviços operem da maneira mais eficiente possível. Espera-se que o uso das redes 5G atuem diretamente em mudanças socioeconômicas no mundo, com transformações inovadoras no ramo industrial, com aumento na produtividade e eficiência de processos e serviços e no estilo de vida da população, onde a conexão será para qualquer pessoa, em todo lugar e a todo momento [1]. A Figura 2.1 apresenta um resumo das principais diferenças entre as redes 5G em relação as redes 4G.

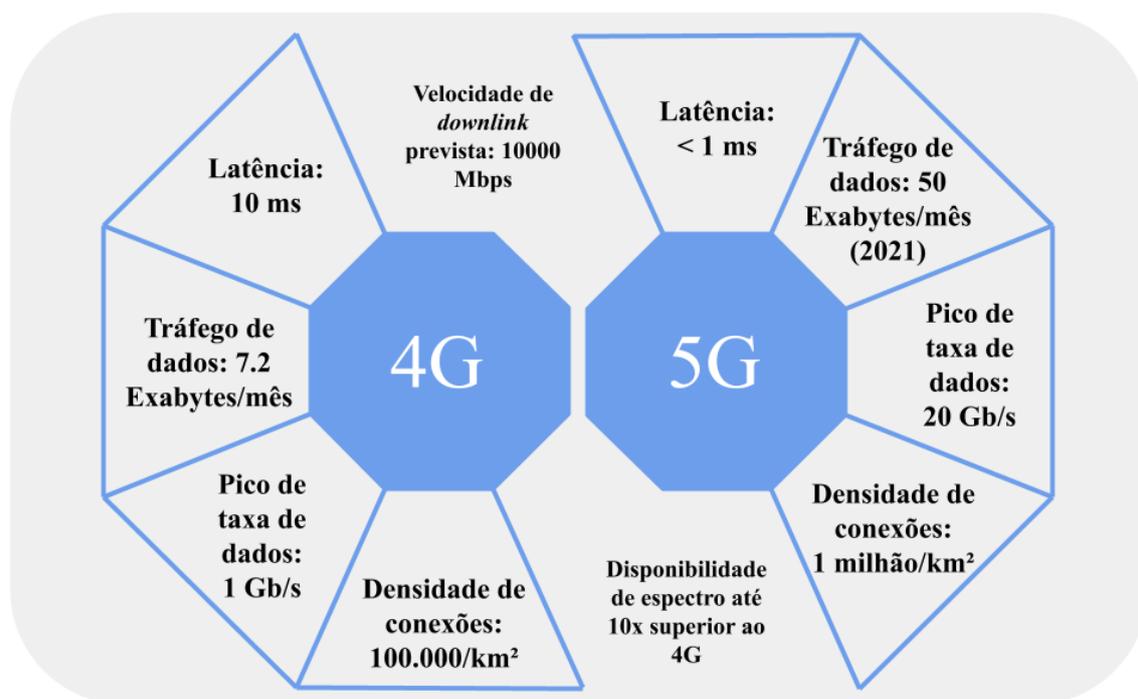


Figura 2.1: Comparação de características entre 4G e 5G. Fonte: adaptada de [1].

Alcançar os requisitos propostos para o 5G pode se tornar uma tarefa desafiadora, em virtude das atuais limitações de *hardware*. Uma das principais questões a serem investigadas está relacionada à eficiência energética, objetiva-se baixo consumo de potência e baterias com longos períodos de funcionamento [23,24]. Além disso, considerando a quantidade de conexões que estas redes irão suportar, a segurança dos dados dos usuários deverá estar fortemente desenvolvida [25].

Outro ponto fator importante a ser avaliado é a utilização do espectro de frequência. É previsto que o 5G ocupe várias bandas espectrais para suportar as aplicações e serviços propostos. Bandas em 600 MHz, 700 MHz e sub 6 GHz (1 GHz a 6 GHz) estão entre as sugeridas para alocação em diversos países [2]. Essas bandas possuem médio e longo alcance, e apresentam alta concentração de serviços. Dessa forma, para atender a necessidade de espectro, bandas acima de 24 GHz até 100 GHz (dentro do espectro de ondas milimétricas), também vem sendo discutidas para o uso do 5G. A Figura 2.2 apresenta um resumo das principais bandas selecionadas para uso do 5G pelo mundo.

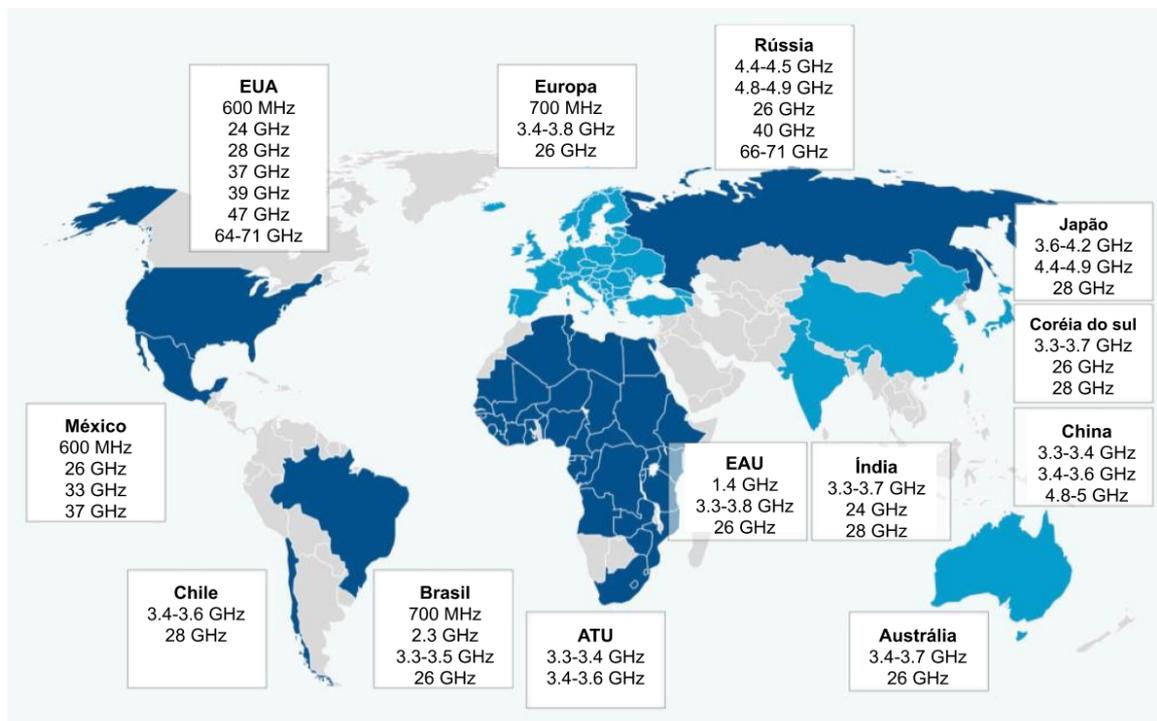


Figura 2.2: Faixas prioritárias para o 5G em diversos países. Fonte: adaptada de [2].

No Brasil, a previsão que é as redes 5G comecem a atuar a partir de 2020. A Anatel vem realizando estudos de viabilidade do uso do espectro em 700 MHz, 2,3 GHz, 3,3 GHz a 3,4 GHz e 3,5 GHz [26], com o intuito de estabelecer as licitações para os primeiros leilões para regularizar o uso dessas bandas pelo 5G. Segundo a Anatel essas faixas disponibilizam 200 MHz. No entanto, seria necessário no mínimo 300 MHz para o 5G no Brasil [26]. Isso abre discussões para o estudo de viabilidade da faixa de 26 GHz [17].

2.2.1 Cenários de uso previstos para 5G

O 5G permitirá aplicações que visam auxiliar diversos aspectos da sociedade. Em cenários que vão desde automação residencial a carros automáticos. Também permitirá

implementações de *small cells*, que são células de curto alcance com diversos benefícios, como alta velocidade de transmissão e privacidade. Além disso, possibilitará o desenvolvimento de cidades inteligentes e de automação industrial. A Recomendação ITU-R M.2083 [22] classificou três principais cenários de uso para o 5G:

- ***Enhanced Mobile Broadband (eMBB)***: este cenário abrange uma variedade de casos, incluindo cobertura de área ampla e *hotspot*, os quais possuem requisitos diferentes. Para o caso do *hotspot*, ou seja, para uma área com alta densidade de usuários, é necessária uma capacidade de tráfego muito alta, enquanto que a necessidade de mobilidade é baixa e a taxa de dados do usuário é alta. O cenário de cobertura de área ampla enfatiza a mobilidade e a cobertura dos usuários, apresentando requisitos mais baixos em relação à taxa de dados e densidade do usuário em comparação com o cenário de *hotspot*.
- ***Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC)***: este cenário corresponde a serviços que exigem altos requisitos de latência, confiabilidade e alta disponibilidade. Este cenário caracteriza-se por abranger tanto a comunicação centrada em humanos, quanto em máquinas;
- ***Massive Machine Type Communications (mMTC)***: este cenário corresponde a serviços que apresentam um grande número dispositivos conectados, extensas áreas de cobertura, que usem dispositivos de baixo custo e que apresentem uma vida útil de bateria muito longa. Caracteriza-se como comunicação centralizada em máquina e onde será mais exigido os requisitos de 5G.

Esses cenários de uso são ilustrados na Figura 2.3, com alguns exemplos de casos de uso relevantes.

A Internet das coisas (do inglês *Internet of things* - IoT) é uma das principais aplicações previstas para a tecnologia 5G. Refere-se ao conceito que define a conexão entre dispositivos inteligentes e pessoas à Internet, com o intuito de coletar e transmitir informações a todo momento, automatizando processos e serviços [25]. De acordo com [23], a IoT apresenta seis elementos: identificação, sensoriamento, tecnologias de comunicação, computação, serviços e semântica, conforme apresentado na Figura 2.4.

Na **Identificação**, realiza-se a nomeação e relação entre serviços com sua demanda, por exemplo, códigos de produtos eletrônicos. No **sensoriamento** é realizada a coleta de dados de um determinado parâmetro e enviado para um banco de dados ou similar. Os dados coletados são posteriormente analisados para a execução de ações específicas, com base nos

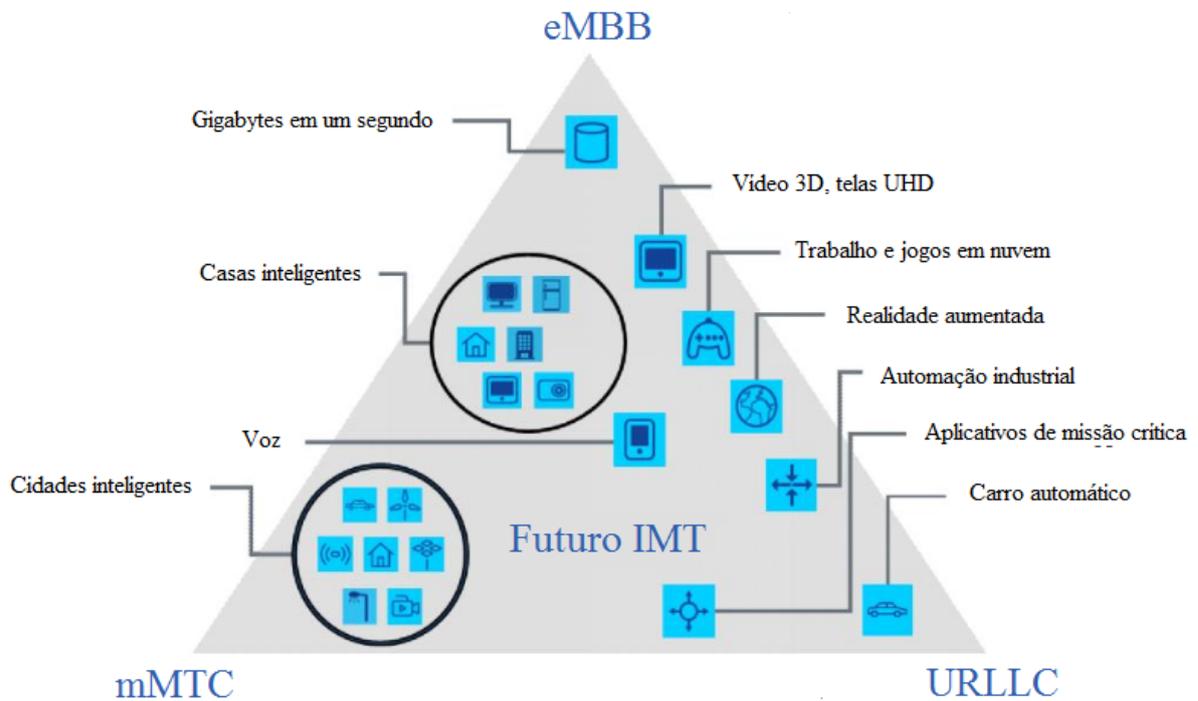


Figura 2.3: Mapeamento de casos de uso do 5G dentro de cenários de uso. Fonte: [3].



Figura 2.4: Elementos de IoT. Fonte: [3].

serviços necessários. Um exemplo de sensoriamento é o uso sensores de umidade, sensores de temperatura, etc. As **tecnologias de comunicação** conectam dispositivos heterogêneos para fornecimento serviços inteligentes. Exemplos de protocolos de comunicação usados são IEEE 802.11, Bluetooth, IEEE 802.15.4, *Z-wave*, *LTE-Advanced* e futuramente o 5G. Na **computação**, as unidades de processamento de *hardware* e aplicações de *software* são responsáveis pela capacidade computacional da IoT na execução de tarefas. A plataforma em nuvem apresenta uma papel fundamental na parte computacional de IoT, pois fornecem recursos para que os dispositivos inteligentes enviem seus dados para a nuvem, para que uma quantidade massiva de dados não estruturados (*big data*) sejam processados em tempo real e, eventualmente, para que os usuários se beneficiem do conhecimento extraído dos *big datas* coletados [3]. Os **serviços** em IoT podem ser categorizados em quatro classes: serviços relacionados à identidade, onde cada aplicativo que mapeia dispositivos do mundo real para o mundo virtual necessita identificá-los primeiro; serviços de agregação de informações, que reuni e resume as informações brutas que precisam ser processadas e relatadas; serviços de conhecimento colaborativo, que utilizam os dados brutos coletados para tomar decisões e reagir de acordo com cada exigência; e serviços onipresentes, que oferecem serviços como suporte colaborativo para qualquer pessoa sob demanda, a qualquer momento e em qualquer lugar. Por fim, a **Semântica** está relacionada a capacidade de extrair conhecimento de diferentes dispositivos, de maneira inteligente, para fornecer os serviços necessários. A extração de conhecimento inclui a descoberta e o uso de recursos e modelagem de informações [3].

2.2.2 Principais requisitos do 5G

Os requisitos previstos para o 5G estão ligados diretamente às tendências tecnológicas do setor de redes sem fio. Nesta nova tecnologia, espera-se a capacidade de suportar grande quantidade de tráfego e de usuários com altas taxas de dados.

Nas Recomendações ITU-R M.2410-0 [12], ITU-R M.2411-0 [27] e ITU-R M.2412-0 [28] são definidas as capacidades, requisitos e critérios de validação necessários para o estabelecimento de um sistema 5G, respectivamente. Na Recomendação ITU-R M.2410 estão definidas as capacidades mínimas relacionadas ao desempenho da interface de rádio. Na Recomendação ITU-R M.2411 é definido o modelo utilizado de submissão para validação de tecnologia candidata ao 5G. Na Recomendação ITU-R M.2412 são detalhadas as metodologias utilizadas para validação dos requisitos da rede 5G, que incluem estudos de simulações reais, métodos analíticos e/ou por inspeção (análise de função e parametrização de propostas) [28].

Em relação às capacidades da interface do rádio 5G, a Recomendação ITU-R M.2410-0 [12] estabelece os seguintes requisitos:

-
- **Taxa de dados:** obtidas sob circunstâncias ideais, está relacionada a taxa máxima de bits/s recebida em um móvel em condições livres de erros. Em cenário eMBB, é requerida uma taxa de *uplink* de até 10 Gb/s e *downlink* de até 20 Gb/s.
 - **Eficiência espectral:** dada pela taxa de dados máxima sob condições ideais normalizadas pela largura de banda do canal em bit/s/Hz exigida é de 15 bit/s/Hz para *uplink* e 30 bit/s/Hz para *downlink*.
 - **Taxas de experiência de usuário:** é de 50 Mb/s para *uplink* e 100 Mb/s para *downlink*.
 - **Capacidade de tráfego por área:** em *downlink* é de 10 Mbit/s/m² em cenário *indoor* para eMBB.
 - **Latência:** caracteriza-se como o tempo de envio com êxito que um pacote leva da fonte até o recebimento pelo destinatário, em *ms*. Para suportar aplicações de eMBB e URLLC, são necessárias latências de 4 *ms* e 1 *ms*, respectivamente. No plano de controle de latência, que se refere ao tempo de transição de um estado de inatividade para o início da transferência contínua de dados, espera-se uma latência dentro de 20 *ms*, porém também são encorajadas obtenção de latência dentro de 10 *ms*.
 - **Densidade de conexões:** caracteriza-se como o número total de dispositivos que atendem a uma qualidade de serviço (QoS) específica por *km*². Em cenário para aplicações de mMTC, a quantidade mínima de densidade de conexões é de 1.000.000 de dispositivos/*km*².
 - **Eficiência energética:** percebendo-se uma tendência para tecnologias verdes, o sistema energético dessas redes devem ser capazes de minimizar o consumo em relação a capacidade de tráfego fornecida. Devem ser considerados suporte para os seguintes aspectos: transmissão de dados eficiente, em caso de uso e baixo consumo de energia, quando não há dados transmitidos.
 - **Confiabilidade:** caracteriza-se como a capacidade de transmitir uma determinada quantidade de dados dentro de um período de tempo predeterminado com alta probabilidade de sucesso, aplicado principalmente a cenários URLLC. O requisito mínimo de confiabilidade é a probabilidade = $1 - 10^{-5}$ de chances de sucesso de transmissão em ambiente de teste Macro-URLLC urbano.
 - **Mobilidade:** define-se como a velocidade máxima de movimentação de uma estação móvel, na qual o QoS pode ser alcançado. Para uso em eMBB, espera-se suporte para os

seguintes cenários: ambiente *indoor* com mobilidade de 10 km/h com uma eficiência de 1,5 bit/s/Hz; ambiente urbano denso com mobilidade de 30 km/h com uma eficiência de 1,12 bit/s/Hz; em ambiente rural com mobilidade de 120-500 km/h com uma eficiência de 0,8-0,45 bit/s/Hz.

- **Largura de banda:** O requisito mínimo de largura de banda no 5G é de 100 MHz, devendo-se suportar larguras de banda de até 1 GHz para operação em bandas de frequência mais altas, acima de 6 GHz, por exemplo.

Essas capacidades podem ser resumidas em: taxa de dados de pico muito alta; taxa de dados de usuário muito alta e garantida; baixa latência de interface aérea; alta mobilidade e qualidade de serviço satisfatória; habilitação de conexão massiva em cenário de alta densidade; alta eficiência energética para rede e dispositivo; eficiência espectral consideravelmente melhorada; capacidade de tráfego de área, significativamente, maior; alta flexibilidade de espectro e largura de banda; alta confiabilidade e boa capacidade de resiliência; melhora na segurança e privacidade.

No entanto, vale ressaltar que as características apresentadas nas Recomendações ITU-R M.2410-0 e ITU-R M.2411-0 servem como base para se criar uma ideia geral do que se espera de um sistema 5G, não devendo ser tomado como obrigatória a aplicação de todos estes parâmetros em implementações particulares de 5G [12].

2.2.3 Tecnologia de acesso *5G New Radio*

5G New Radio (5G NR) é a nova tecnologia de acesso por rádio (RAT) proposta pela *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), sendo estabelecido como padrão para interface aérea de redes 5G [29].

A 5G NR apresenta alguns benefícios, comparado às tecnologias anteriores. O primeiro deles está relacionado ao suporte para exploração de outras faixa de espectro em que a tecnologia de acesso por rádio pode ser implantada, com a finalidade de operar em mais espectros, para suportar grandes larguras de bandas. O 5G NR suporta operação em faixas licenciadas sub 1 GHz até 52,6 GHz, com planejamento para extensão em faixas não-licenciadas [29].

O segundo aspecto do 5G NR está relacionado ao uso do *design ultra-lean*, que busca minimizar a interferência causada por recursos de sinalização, de forma a maximizar a eficiência dos recursos. Em tecnologias anteriores como LTE, as transmissões de sinalização apresentam pouco impacto, pois esses sinais representam apenas uma pequena parcela dos

sinais transmitidos. No entanto, se tratando de redes supermassivas, como as redes 5G ou com muitas *small cells*, tal aspecto pode impactar diretamente no desempenho da rede.

O terceiro aspecto é relativo a chamada compatibilidade à frente, que resulta no desenvolvimento de um *design* de interface de rádio que permite uma evolução futura para introdução de novas tecnologias e de novos serviços com requisitos e características ainda desconhecidos, ao mesmo tempo em que mantém suporte a dispositivos anteriores na mesma portadora.

O quarto aspecto está relacionado a possibilidade de baixa latência. Os requisitos dos tempos de processamento dos dispositivos e rede são significativamente reduzidos no 5G NR em comparação com o LTE. Protocolos de camada superior, como *media access control* (MAC) e *radio link control* (RLC), também foram projetados visando a baixa latência, com estruturas de cabeçalho definidas para permitir o processamento sem conhecer a quantidade de dados que vão ser transmitidos.

O quinto aspecto está relacionado ao suporte para um grande número de elementos de antena direcionáveis para transmissão e recepção. Em altas frequências, é usado principalmente o *beamforming* para estender a cobertura de transmissão, enquanto que em bandas mais baixas, é feito uso de MIMO massivo.

O *beamforming* faz parte do padrão IEEE 802.11ac de redes sem fio [30], e trata-se de uma técnica de transmissão ou recepção, na qual o lóbulo de potência do sinal é orientado em direção a um usuário a partir de um array de antenas [31]. Apesar de não ser de uma técnica recente, o uso de *beamforming* só passou a se popularizar como complementação ao uso de MIMO dentro da nova geração das telecomunicações, para o atendimento do requisito de eficiência espectral [2].

2.3 Faixas de Ondas Milimétricas

Ondas milimétricas são as faixas de frequência com comprimento de onda de 10 mm a 1 mm, que correspondem a porção do espectro de radiofrequência de 30 GHz a 300 GHz [4] e que surgiu como forte componente para o desenvolvimento da tecnologia 5G. Esse espectro terá um papel fundamental no atendimento da demanda de novos serviços, bem como para prover melhorias na conectividade de última geração para dispositivos ou equipamentos de grande porte (maquinário industrial, veículos, etc.).

2.3.1 Principais vantagens de uso

A maior vantagem presente nesta faixa de espectro é a disposição de maiores larguras de banda de todo o espectro e, conseqüentemente, maiores taxas de transmissão de dados. Por outro lado, essa banda é mais sensível à atenuação por obstáculos, devido ao curto comprimento de onda. Essa última característica é útil quando aplicada ao 5G em implementações de *small cells* [32]. Mesmo com alcance de transmissão limitado, tais bandas de ondas milimétricas são úteis para uma variedade de aplicações, incluindo a transmissão de grandes quantidades de dados, comunicações celulares de dados e voz em alta velocidade, radares e Internet. Conforme descrito em [4], outras vantagens presentes nesta faixa incluem:

- *Operações sem licença* - a maior parte dessas frequências não estão licenciadas, portanto, livres para uso;
- *Operação altamente segura* - devido as curtas distâncias de transmissão, largura de feixe estreita de antena e ausência de penetração na parede.
- *Alto nível de reutilização de frequência* - a necessidade de comunicação de múltiplas células dentro de uma pequena região geográfica podem ser satisfeitas.
- *Velocidade de transmissão de dados* - são próximas as obtidas pelas fibras ópticas;
- *Tecnologia robusta* - com longo histórico de uso em comunicações de segurança;
- *Permissão para enlaces de comunicação de classe de portadora* - classe de portadora são quaisquer componentes do sistema (*software* ou *hardware*) com capacidades testadas e comprovadas. Será possível projetar enlaces de 60 GHz extremamente confiáveis, oferecendo disponibilidade de quase 100% (99,999%).

2.3.2 Perdas de propagação

Nas faixas de ondas milimétricas há uma alta perda na propagação devido a curtos comprimentos de ondas, o que torna o alcance destas frequências bem limitadas em transmissões. Para aumentar o alcance do sinal nestas faixas, obrigatoriamente são necessários altos ganho de antena para mitigar este problema [33]. A perda no enlace entre um transmissor e um receptor pode ser analisada através da relação da potência recebida sobre a potência transmitida. Esta relação pode ser expressada a partir da fórmula de Friis, que considera

todos os fatores atuantes entre o transmissor e o receptor, sendo definida pela Equação 2.1 [4]:

$$10\log\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = 10\log[G_{RX}G_{TX}\frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2L}] \quad (\text{dB}), \quad (2.1)$$

Onde: G_{TX} é o ganho de antena do transmissor; G_{RX} é o ganho de antena do receptor; λ é o comprimento de onda em questão, R é a distância de separação entre o transmissor e o receptor em visada direta; e L é o fator de perda do sistema (≥ 1).

Desconsiderando outros parâmetros na fórmula de Friis, como os ganhos das antenas, obtém-se a equação da perda por espaço livre, que define todas as perdas entre duas antenas isotrópicas em visada direta. A perda de propagação no espaço livre é mostrada na Equação 2.2 [4]:

$$L_{free_space} = 20\log_{10}(4\pi\frac{R}{\lambda}) \quad (\text{dB}), \quad (2.2)$$

Onde: L_{free_space} é a perda no espaço livre, R é a distância entre as antenas de transmissão e recepção, e λ é o comprimento de onda em uso. Isso mostra que a perda no espaço livre aumenta quando a frequência e/ou o alcance aumentam.

Outro modelo utilizado para cálculo de perda de propagação é modelo ITU-R P.452-16 [34], o qual foi desenvolvido para avaliar a interferência entre estações na superfície da terra em frequências acima de 0,1 GHz. Neste modelo, a perda de propagação no espaço livre e considerando a atenuação por gases atmosféricos (L_{bfsq}) é calculada pela Equação 2.3:

$$L_{bfsq} = 92,5 + 20\log(f) + 20\log(d) + [\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d \quad (\text{dB}), \quad (2.3)$$

sendo f a frequência em GHz; A_g a absorção de gases total (dB), dada por $[\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d$; onde γ_o e $\gamma_w(\rho)$ são as atenuações, em dB/km, devido ao ar seco e ao vapor de água, respectivamente, dados a partir de $\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820f(N'_{Oxygen}(f) + N''_{WaterVapour}(f))$, cujo os parâmetros completos pode ser consultados em [35]; d é a distância em km entre transmissor e receptor, considerando a curvatura da terra (chamada de distância ortodrômica); ρ é a densidade do vapor de água (g/m^3), dada por $\rho = 7,5 + 2,5\omega$; e ω é a fração do percurso total sobre a água [34].

Em estudos de coexistência que fazem uso do modelo ITU-R P.452-16, também é utilizando o modelo ITU-R P.2108-0 para calcular a perda por *clutter* [7,21]. O *clutter* refere-se

perda por obstáculos presentes no percurso, tais como edifícios ou vegetação, e que estão na superfície da Terra [36]. Essa perda (L_{ctt}) é calculada pela Equação 2.4.

$$L_{ctt} = -5\log(10^{-0,2L_l} + 10^{-0,2L_s}) - 6Q^{-1}\left(\frac{p}{100}\right) \text{ (dB)}, \quad (2.4)$$

Onde: f é a frequência do sistema; $L_l = 23,4 + 9,6\log(f)$; $L_s = 32,98 + 23,9\log(d) + 3\log(f)$; d é a distância total do percurso de propagação; e $Q^{-1}\left(\frac{p}{100}\right)$ é a inversa complementar da função de distribuição normal;

Os fatores atmosféricos são um dos principais fatores atenuantes para as faixas de ondas milimétricas. Estas faixas são mais suscetíveis à essas atenuações por gases ou chuvas, como pode ser observado na Figura 2.5. Esta perda está relacionada a absorção do sinal por moléculas de oxigênio e vapor d'água [4]. As faixas entre 25-30 GHz e de 70-100 GHz são as que apresentam menores atenuações, devido a elementos atmosféricos, em torno de 0,1 dB a 2 dB. Enquanto a faixa de 60 GHz e acima de 100 GHz são as que apresentam as maiores atenuações, de 1 até 20 dB.

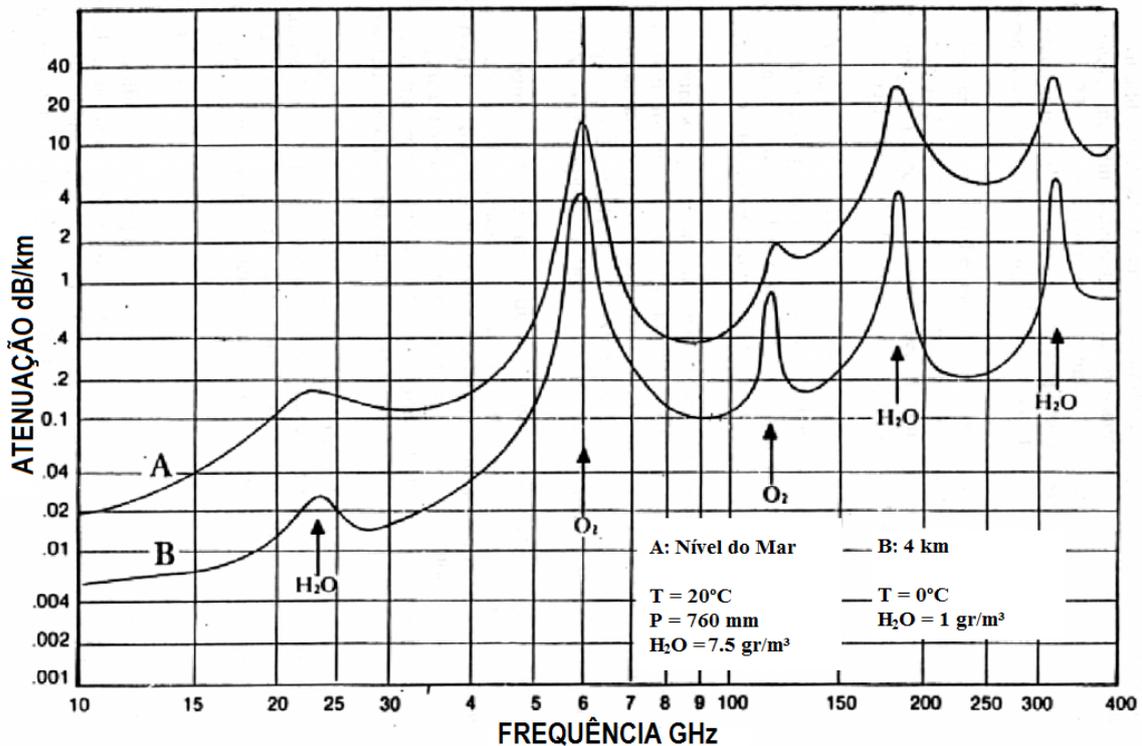


Figura 2.5: Média de absorção atmosférica nas faixas de ondas milimétricas. Fonte: [4].

O ruído de fase também é apresentado fator atenuante nestas faixas, com aumento diretamente proporcional ao aumento da frequência. Este parâmetro corresponde a dimensão de estabilidade do sinal no domínio da frequência. As ondas milimétricas apresentam uma

sensibilidade maior a este tipo de ruído, por isso, há uma limitação no número de esquemas de modulação que podem ser aplicados nesta faixa. Uma consequência direta deste ruído é a limitação do alcance de comunicações nas faixas de ondas milimétricas [29]. Isso implica que as bandas de ondas milimétricas são melhores aplicadas em comunicações a curtas distâncias.

A utilização do espectro de ondas milimétricas pelas redes 5G permitirá alta largura de banda, combinada com ganhos adicionais via *beamforming*. O espectro disponível nessas frequências mais altas pode ser até 200 vezes maior do que as alocações de celulares atualmente. Além disso, os comprimentos de onda muito pequenos dos sinais e os avanços nos circuitos de rádio-frequência de baixa potência permitem que MIMO de alta ordem (superior a 32 elementos) sejam colocados em pequenas dimensões [20]. Esses sistemas de MIMO podem ser usados para formar matrizes de altíssimo ganho [16].

2.3.3 Situação atual do espectro de ondas milimétricas

O uso não eficiente do espectro é um dos principais fatores para migração em faixas de ondas milimétricas, visto que parte das faixas atualmente ocupadas apresentam inatividade por longos períodos. Embora as faixas sub 1 GHz e sub 6 GHz estejam entre as faixas mais disputadas pelas operadoras de telefonia, as faixas de ondas milimétricas têm sido objeto de estudo de viabilidade de uso, principalmente para aplicação das redes 5G, onde a principal característica dessa faixa é a capacidade de banda do canal, com previsão de capacidade até 10 vezes mais que o atual 4G LTE e é onde apresenta a maior concentração de ociosidade do espectro [20] e [16].

Atualmente, o espectro de ondas milimétricas está licenciado para serviços, como enlace ponto-a-ponto, ponto-multiponto, radar, radionavegação, satélite, entre outros. A resolução 238 da WRC especifica 8 bandas candidatas (nas frequências de 24,25 a 86 GHz) para o desenvolvimento do padrão IMT-2020 [13]. O padrão IMT-2020 estabelece os requisitos emitidos pelo ITU-R para redes, dispositivos e serviços 5G. Ele destina-se a fornecer serviços de telecomunicações em escala mundial, independentemente da localização e tipo de rede ou terminal [13].

Tecnicamente, o compartilhamento no espectro de ondas milimétricas entre redes 5G e enlaces de FS pode ser coordenado [37], uma vez que, para algumas aplicações, as posições do transmissor e do receptor FS são conhecidas por instituições reguladoras e alguns parâmetros (como a potência de transmissão) são regulados. Para que a coexistência seja considerada, é importante prever o uso do espectro de FS e avaliar a interferência que a rede 5G pode causar em um FS existente. Em outras palavras, deve-se verificar se é possível implantar uma rede

5G sem alterar o sistema FS.

2.3.4 Uso das faixas milimétricas no Brasil

No Brasil, parte da banda do espectro de ondas milimétricas encontram-se reservadas para pesquisas, comunicações militares ou para comunicações via satélites. Um quadro completo de todos os serviços atuantes no espectro brasileiro pode ser constatado no Anexo 6. A Tabela 2.1 mostra as bandas de frequências candidatas para uso do IMT-2020, conforme a WRC [13], bem como a subdivisão dessas faixas no Brasil e os serviços primários alocados, de acordo com o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil, estabelecido pela Anatel [38].

Observa-se na Tabela 2.1 que, no Brasil, existem 15 tipos de sistemas e serviços que operam nas faixas de ondas milimétricas candidatas ao uso pelas redes 5G. Além dos FS, tem-se: radionavegação; comunicação entre satélites; radiolocalização; fixo por satélite; móvel; móvel por satélite; sinais de padrões de frequência e tempo por satélite; exploração da terra por satélite; pesquisa espacial; radionavegação por satélite; radiodifusão; radiodifusão por satélite; radioastronomia e astronomia. No entanto, o FS é um dos serviços predominantes nessas faixas do espectro, sendo portanto um dos que mais serão afetados pela implantação das redes 5G. Este serviço é definido como qualquer transmissão de um determinado serviço, como de operadoras de telefonia, de Internet, TV e satélite, que utilizam sistemas ponto-a-ponto ou ponto-multiponto. Uma comunicação ponto-a-ponto é estabelecida a partir de conexão em visada direta (LOS) entre duas estações fixas por meio de uma comunicação sem fio. Este tipo de sistema apresenta configuração de transmissão livre, direta e simplificada, sendo mais utilizado para criar enlaces dos mais diversos tipos de serviços. A utilização deste tipo de enlace do Brasil pode requerer uma autorização prévia da Anatel, dependendo do tipo de utilização.

A faixa de 26 GHz foi proposta pela Anatel [17], em contrapartida a faixa de 28 GHz, com a justificativa que o 5G não competisse com serviços de comunicação via satélite que apresenta prioridade de uso nesta faixa no Brasil. A faixa de 26 GHz poderá ser destinada principalmente a aplicações de 5G que exigem alta taxas de dados.

Tabela 2.1: Serviços em operação no Brasil na banda de ondas milimétricas candidatas ao IMT-2020.

Bandas candidatas (GHz) [13]	Faixa de Alocação no Brasil [38]	Atribuição no Brasil [38]
24.25-27.5	24.25-24.45	Radionavegação
	24.45-24.65	Entre satélites; Radionavegação
	24.65-24.75	Entre satélites; Radiolocalização por satélite
	24.75-25.25	Fixo por satélite
	25.25-25.5	Fixo; Entre satélites; Móvel; Sinais padrões de frequência e tempo
	25.5-27	Exploração da Terra por satélite; Fixo; Entre satélites; Móvel; Pesquisa espacial; Sinais padrões de frequência e tempo
	27-27.5	Fixo; Fixo por satélite; Entre satélites; Móvel
37-40.5	37-37.5	Fixo; Pesquisa espacial
	37.5-38	Fixo; Fixo por satélite; Pesquisa espacial; Exploração da Terra por satélites
	38-39.5	Fixo; Fixo por satélite; Exploração da Terra por satélites
	39.5-40	Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Móvel por satélite; Exploração da Terra por satélites
	40-40.5	Exploração da Terra por satélite; Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Móvel por satélite; Pesquisa espacial; Exploração da Terra por satélite
45.5-47	43.5-47	Móvel; Móvel por satélite; Radionavegação; Radionavegação por satélite
47.2-50.2	47.2-47.5	Fixo; Fixo por satélite; Móvel
	47.5-47.9	
	47.9-48.2	
	48.2-50.2	
50.4-52.6	50.4-51.4	Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Móvel por satélite
	51.4-52.6	Fixo; Móvel
66-76	66-71	Exploração da Terra por satélite; Fixo; Entre satélites; Móvel; Pesquisa espacial
	71-74	Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Móvel por satélite
	74-76	Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Móvel por satélite; Radiodifusão; Radiodifusão por satélite
81-86	81-84	Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Móvel por satélite; Radioastronomia; Pesquisa espacial
	84-86	Fixo; Fixo por satélite; Móvel; Astronomia

Cálculo da relação Interferência/Ruído

- Abordagem da ferramenta

SEAMCAT

O SEAMCAT - *Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool* - é um *software* de uso livre para simulação estatística do método de Monte Carlo para cálculo de interferência entre sistemas sem fio, tanto em cenários de interferência de co-canal (compartilhamento) e frequência adjacente (compatibilidade), desenvolvido durante a *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* (CEPT) e mantido pela *European Communications Office* (ECO) [5]. A principal concepção para esta ferramenta é permitir, de maneira acessível e simplificada, análises para estudos de compartilhamento e compatibilidade de espectro de rádio (parâmetros, métodos e resultados) dentro da CEPT usando uma interface comum [5].

3.1 Funcionamento

Nesta ferramenta, são ajustados parâmetros de um transmissor e receptor em um ou mais sistemas, distintos ou não, que irão atuar ou como interferente ou como vítima. A simulação deve apresentar 4 componentes básicos: um enlace de transmissor interferente (do inglês *Interfering Link Transmitter* - ILT), um enlace de transmissor vítima (do inglês *Victim Link Transmitter* - VLT), um enlace de receptor interferente (do inglês *Interfering Link Receiver* - ILR) e um enlace de receptor vítima (do inglês *Victim Link Receiver* - VLR). É possível definir uma gama de parâmetros para a construção destes sistemas, tais como: posição das estações de transmissão, potência de transmissão, ganho de antena, frequência de uso, padrão de radiação, altura de antena, etc. Uma vez efetuada as devidas configurações dos

sistemas, o método de Monte Carlo será aplicado para obter a média dos resultados de cada evento gerado. Com base nestes resultados, é efetuado o cálculo de interferência, utilizando a abordagem que for mais conveniente ao usuário. A Figura 3.1 apresenta a tela inicial do SEAMCAT, por onde são realizadas as configurações dos sistemas.

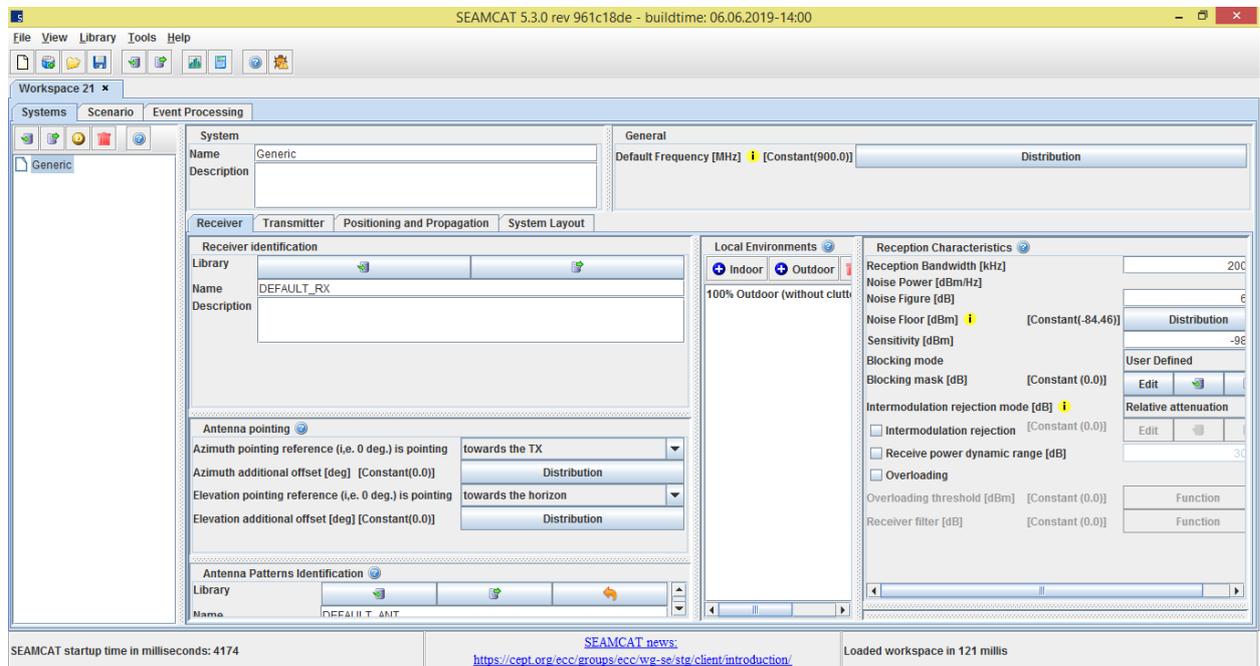


Figura 3.1: Interface gráfica do SEAMCAT.

Diversos tipos de sistemas encontram-se implementados para simulação, sendo os três principais:

- Módulo genérico: usado para simulações de sistemas de radiodifusão de sistemas de satélites, FS, como por exemplo FS ponto-a-ponto e ponto-multiponto, e serviços móveis terrestres, como dispositivos de curto alcance e componentes terrestres de sistemas de satélite;
- Módulo *Code Division Multiple Access* (CDMA): utilizado tanto para simulações de sistemas móveis 3G quanto para satélites;
- Módulo *Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access* (OFDMA): usado para simulação de sistemas LTE (*Long Term Evolution*).

O SEAMCAT possui um conjunto de bibliotecas pré-definidas, porém, o usuário também pode criar bibliotecas próprias para antenas, máscaras espectrais, modelos de propagação, sistemas de rádio, entre outros, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de cenários mais complexos de investigação.

3.2 Método de Monte Carlo aplicado ao SEAMCAT

O método de Monte Carlo refere-se a um conjunto de algoritmos computacionais para simular processos aleatórios, obtendo-se amostras aleatórias a partir de uma dada função de densidade de probabilidade [39]. Este método permite que, em muitos casos, a simulação direta do processo físico, não sendo necessário nem escrever as equações diferenciais que descrevem o comportamento do sistema, sendo necessário apenas que o sistema seja descrito por funções de densidade de probabilidade (pdf) [6]. Uma vez que a pdf dos parâmetros mais relevantes são conhecidas (por exemplo, a localização dos interferentes em relação à vítima, potência de sinal desejada do enlace vítima, os canais/frequências de uso das vítimas e interferentes), o método de Monte Carlo, gera amostras aleatórias para cada evento de um dado cenário. Se um número suficiente de eventos forem considerados, os resultados podem ser avaliados com um alto nível de precisão, com base na média dos resultados analisados, de forma a obter-se um valor estimado de interferência para cada cenário. A ferramenta modela um receptor vítima que opera entre uma população de interferentes, podendo pertencer ao mesmo sistema vítima, a um sistema diferente, ou ambos. Esta distribuição é dada de forma aleatória em torno da vítima. A forma como é realizada a distribuição de interferentes varia de acordo com a preferência de usuário. A Figura 3.2 ilustra como os interferentes e a vítima podem aparecer em uma simulação.

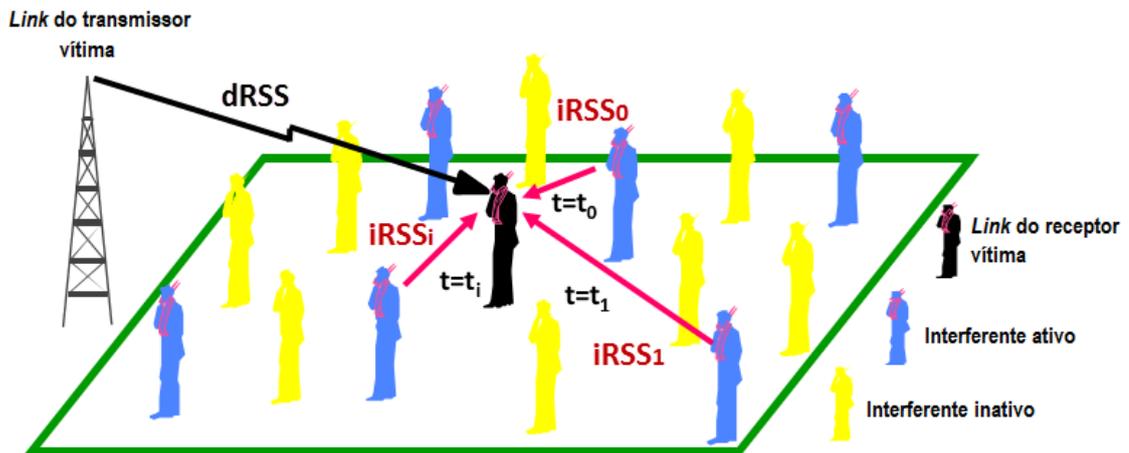


Figura 3.2: Cenário típico de interferência de um evento de simulação de Monte Carlo [5].

Várias análises de interferência estão incluídos nesta metodologia, como emissões indesejadas, bloqueio de receptores, produtos de intermodulação, interferência de co-canal e de canal adjacente. No geral, o critério para que ocorra interferência é quando o limiar estabelecido pelo usuário é ultrapassado pelo nível de interferência, sendo que o nível diretamente relacionado com os níveis de sinal desejado (do inglês *desired Received Signal*

Strength – *dRSS*) e de sinal interferente (do inglês *interfering Received Signal Strength* – *iRSS*).

Para exemplificar como é avaliada esta interferência, consideremos a Figura 3.3 que ilustra a relação C/I, onde *dRSS* correspondente ao C, e *iRSS* correspondente ao I. em 3.3 (a), é representado o caso que não há interferência e o nível do sinal recebido é a soma da sensibilidade (dBm) e da margem de sinal desejado. Em 3.3 (b), é apresentado um caso onde ocorre a interferência, onde observa-se um aumento no nível de ruído. A diferença entre o sinal desejado e o sinal de interferência é medida em dB, que é definido como a relação sinal/interferência (S/N). Essa relação deve ser maior que o limiar de C/I necessário para evitar interferência.

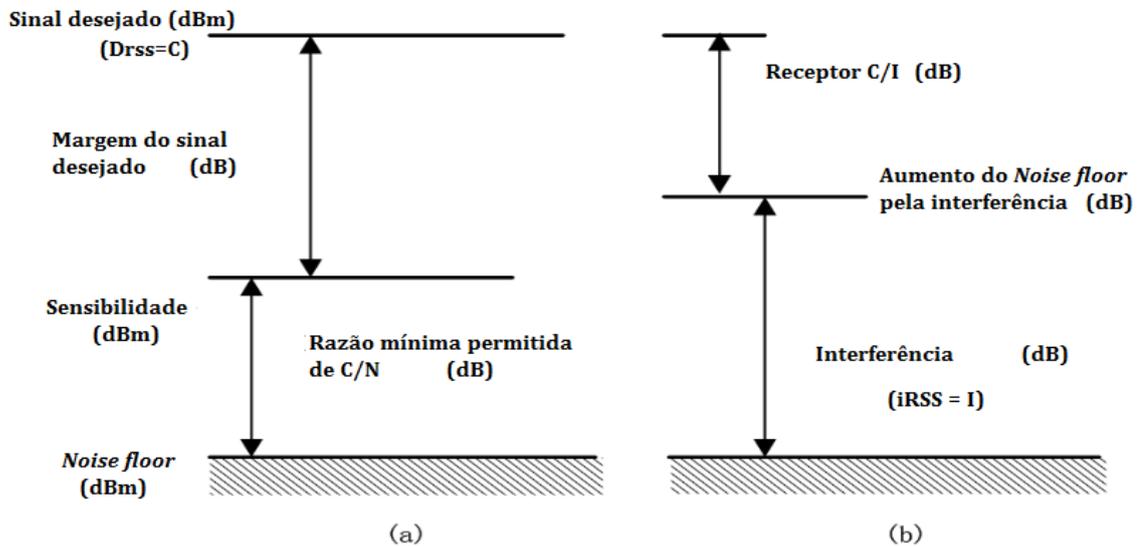


Figura 3.3: Níveis de sinais utilizados para determinar quando há interferências [6].

3.3 Cálculo de interferência no simulador

No cálculo de interferência entre os sistemas, os resultados são recebidos em formato vetorial de *dRSS* e de *iRSS*, sendo realizado um somatório dos vetores de *iRSS* se houver mais de um enlace interferente. Ao final, é feita a comparação dos valores de *iRSS* e de *dRSS* com o critério de interferência escolhido pelo usuário (C/I, C/(I+N), I/N ou I/(I+N)) [5].

Dessa forma, o cálculo do nível do sinal desejado ($dRSS_{calc}$), em dBm, fornecido em [5] é calculado por:

$$dRSS = P_{VLT}^{output} - PL_{VLT \rightarrow VLR} + G_{VLR \rightarrow VLT} + G_{VLT \rightarrow VLR} \quad (3.1)$$

Onde: P_{VLT}^{output} é a potência fornecida pela a antena de VLT, em dBm; $G_{VLT \rightarrow VLR}$ é o ganho de antena VLT em direção de VLR, em dBi; $-G_{VLR \rightarrow VLT}$ é o ganho de antena VLR em direção a VLT, em dBi; $PL_{VLT \rightarrow VLR}$ é a perda de propagação entre VLT e VLR, em (dB).

Para o cálculo de nível de sinal i interferente ($iRSS_{unwanted}^i$), em dBm, de acordo com [5] é dado por:

$$iRSS_{unwanted}^i = emission_{ILT}(f_{ILT} - f_{VLR}) + g_{ILT}^{PC} - max(PL_{ILT \rightarrow VLR} - G_{ILT \rightarrow VLR} + G_{VLR \rightarrow ILT}, MCL) \quad (3.2)$$

Onde: f_{ILT} é a frequência de ILT, em MHz; f_{VLR} é a frequência de VLR, em MHz; $emission_{ILT}(f_{ILT} - f_{VLR})$ é definida como os níveis máximos de potência $emission_{ILT}(\Delta f)$ na largura de banda de referência e que representa a máscara de emissão, em dBm/200kHz; g_{ILT}^{PC} representa o ganho de controle de potência para o ILT dado a partir definição de parâmetros do sistema; $G_{ILT \rightarrow VLR}$ representa o ganho da antena ILT na direção do VLR, em dBi; $G_{VLR \rightarrow ILT}$ é o ganho da antena VLR na direção do ILT, em dBi; $PL_{ILT \rightarrow VLR}$ é a perda de propagação entre ILT e VLR, em dB; MCL representa o cálculo da perda mínima de acoplamento, obtido a partir da definição de outros parâmetros do sistema ou dado como parâmetro de entrada, em dB.

A interferência total recebida ($iRSS_{unwanted}$) é calculada por meio do somatório de cada enlace de interferência, dada por:

$$iRSS_{unwanted} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{iRSS_{unwanted}^i}{10}} \right) \quad (3.3)$$

A probabilidade de interferência (P_I) de um VLR é definida por:

$$P_I = 1 - P_{NI} \quad (3.4)$$

Onde: P_{NI} é a probabilidade de não interferência (NI) de um receptor. Fazendo a consideração do critério I/N, P_{NI} é definido por:

$$P_{NI} = \frac{P\left(\frac{IRSS_{comp}}{N} > \frac{I}{N}, dRSS > sens\right)}{P(dRSS > sens)} \quad (3.5)$$

onde, $iRSS_{comp} = \sum_{j=1}^p iRSS$ é o somatório de todos os interferente ativos, P o número de interferentes e $sens$ é o nível de sensibilidade definido pelo usuário.

3.4 Arquitetura

A arquitetura do SEAMCAT é composta pelos seguintes mecanismos de processamento: mecanismo de geração de eventos (EGE), mecanismo de cálculo de interferências (ICE). Há também mecanismo com os módulos de simulação de sistemas CDMA/OFDMA (CDMA/OFDMA E), um ambiente para implementação de quaisquer mecanismos para cálculos futuros, bem como saídas de interface de usuário estendidas. O armazenamento de dados é baseado no formato XML. Esta arquitetura é mostrada na Figura 3.4, bem como o funcionamento do *software* é detalhado nas seções posteriores.

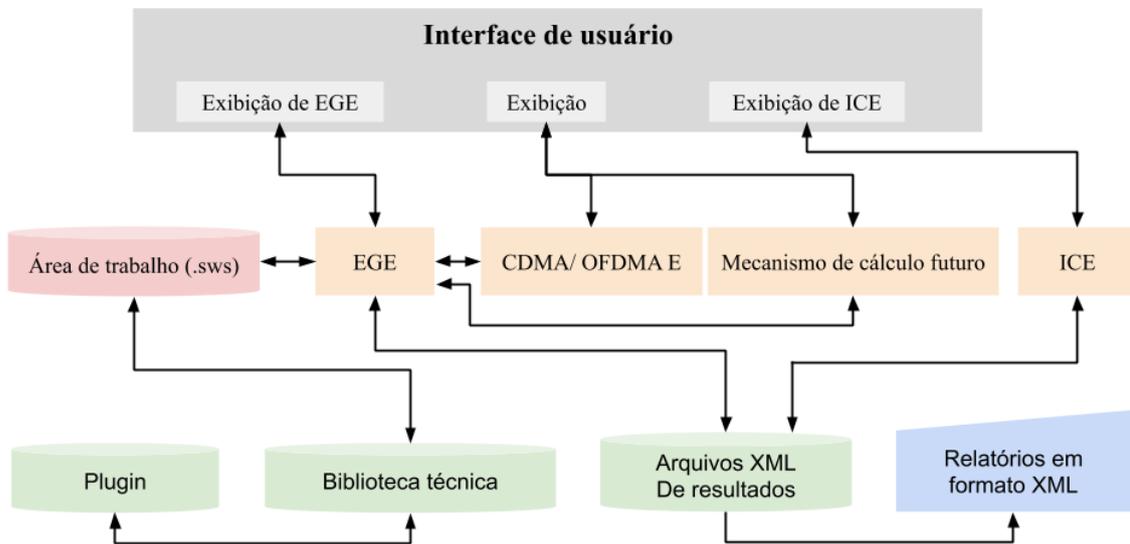


Figura 3.4: Arquitetura do SEAMCAT.

3.4.1 Mecanismo de geração de eventos - EGE

Os sistemas interferentes e vítimas assumem as configurações correspondentes aos parâmetros da área de trabalho. Em seguida, serão calculados os sinais desejados no sistema vítima, os sinais indesejados do sistema interferente para que, ao final da simulação, os valores coletados sejam armazenados no vetor de resultados correspondente. Esse processo é repetido N vezes, onde N é o número de eventos, definido pelo usuário. Amostras geradas dos sinais desejados e de todos os indesejados são armazenados em vetores separados, de comprimento N [39].

3.4.2 Mecanismo de cálculo de interferência - ICE

Uma vez finalizadas as simulações dos eventos, um *plugin* aplicará os resultados adquiridos no mecanismo de simulação de interferência, que realizará os cálculos de interferência entre os sistemas. Este *plugin* fornece dois modos para o cálculo de probabilidades: modo de compatibilidade, que gera um único resultado mostrando a probabilidade de exceder o limite do critério de interferência selecionado pelo usuário; e modo tradução, que gera uma distribuição de probabilidades, de acordo com a variação de um dos parâmetros de referência [5].

3.5 Aplicações

O SEAMCAT é uma ferramenta *open source*, de uso livre, sendo utilizado tanto por grupos da CEPT, quanto por instituições reguladoras, indústria e sociedade acadêmica para simulações de cenários existentes ou propostos, sendo necessário apenas a entrada dos parâmetros do sistema e construção dos cenários para investigação [5].

O SEAMCAT possibilita estudos relacionados a:

- Compartilhamento e compatibilidade com diferentes tipos de equipamentos, operando nas mesmas frequências ou em bandas adjacentes;
- Avaliação do impacto do uso de diferentes máscaras de transmissão e recepção;
- Avaliação dos limites aplicados de emissões indesejadas (espúria e fora de banda), bloqueio ou níveis de intermodulação.

Cenários de Análise

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os cenários para o estudo de coexistência deste trabalho. A construção desses cenários consistiu em três partes: *configuração das redes* a serem simuladas com base nas recomendações e trabalhos relacionados; *descrição do modelo de propagação* utilizado nos testes; e *definição dos parâmetros avaliados*.

4.2 Configuração das redes

Neste trabalho, considerou-se uma rede 5G (IMT-2020) como enlace interferente e uma rede FS ponto-a-ponto como o enlace vítima. Este é um dos cenários propostos para estudo na resolução 238 da WRC [13]. As simulações foram desenvolvidas utilizando-se o *software* de simulação gratuito de código aberto SEAMCAT [5], que irá gerar amostras aleatórias de interferentes baseadas no método Monte Carlo e realizar o cálculo de interferência a partir dos critérios estabelecidos pelo usuário. Analisou-se a interferência co-canal, pois é o pior caso, visto ser maior que a interferência em canal adjacente. Por se tratar de uma avaliação de interferência co-canal, o estudo depende apenas da banda de portadora, não sendo necessários estudos do vazamento de energia na extremidades da banda de transmissão. Do mesmo modo, considerou-se transmissão em *downlink* e *uplink*, avaliando as interferências causadas tanto pela estação base (BS) quanto pelo terminal do usuário (UE). Ainda levando em consideração o pior caso, adotou-se o alinhamento azimutal da antena da BS da rede 5G com o transmissor (TX) e receptor (RX) FS, uma vez que a interferência será maior quando as antenas desses componentes estiverem direcionadas uma para outra. A seguir, são descritas as configurações específicas para cada rede.

4.2.1 Rede FS

Na implementação da rede FS, adotou-se os parâmetros de sistema especificados na Tabela 4.1, cuja escolha baseou-se em [7, 21]. Nesta configuração, o sistema operou na faixa de frequência de 26 GHz e utilizando-se alturas de antenas de 15 m, 30 m e 60 m para o transmissor e receptor. Para altura de 15 m e 30 m, definiu-se ganhos de antena de 36,6 dBi e largura de banda de 28 MHz. Para altura de 60 m adotou-se ganho de antena de 42 dBi e largura de banda de 56 MHz. Estes valores são típicos utilizados em estudos de coexistência, não apresentando impacto direto nas simulações. O padrão de radiação de antena utilizado foi o ITU-R F.699 [40], o qual apresenta referências de radiação para antenas de FS sem fio nas faixas de frequência de 100 MHz a 86 GHz. Este padrão, também é utilizado para estudos de compartilhamento ou reusos de frequência [14, 41]. A título de ilustração, a Figura 4.1 apresenta o diagrama de radiação para os ganhos de 36,6 dBi e 42 dBi. Este sistema também apresenta figura de ruído de 6,5 dB, valor típico para estudos de coexistência [7, 21].

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração da rede FS.

Parâmetros	Sistema FS		
Frequência	26 GHz		
Altura das antenas	15 m	30 m	60 m
Ganho máximo da antena	36,6 dBi	36,6 dBi	42 dBi
Largura de banda	28 MHz	28 MHz	56 MHz
Padrão de radiação	ITU-R F.699		
Figura de ruído	6,5 dB		
Potência de transmissão	18 dBm [42]		
Distância entre Tx e Rx	5 km		
Limiar de proteção I/N	-10 dB		

Adotou-se potência de transmissão de 18 dBm, conforme [42] e distância entre o transmissor e o receptor de 5 km. No entanto, esse valor de potência não afeta diretamente os resultados, uma vez que neste trabalho, analisa-se a interferência da rede 5G sobre o FS, por meio da relação I/N no receptor de FS. Esta relação é o novo critério de proteção proposto na Recomendação ITU-R F.758-6 [43] para estudos de compartilhamento e compatibilidade, na qual é definida como razão entre a densidade de potência de interferência I e a densidade

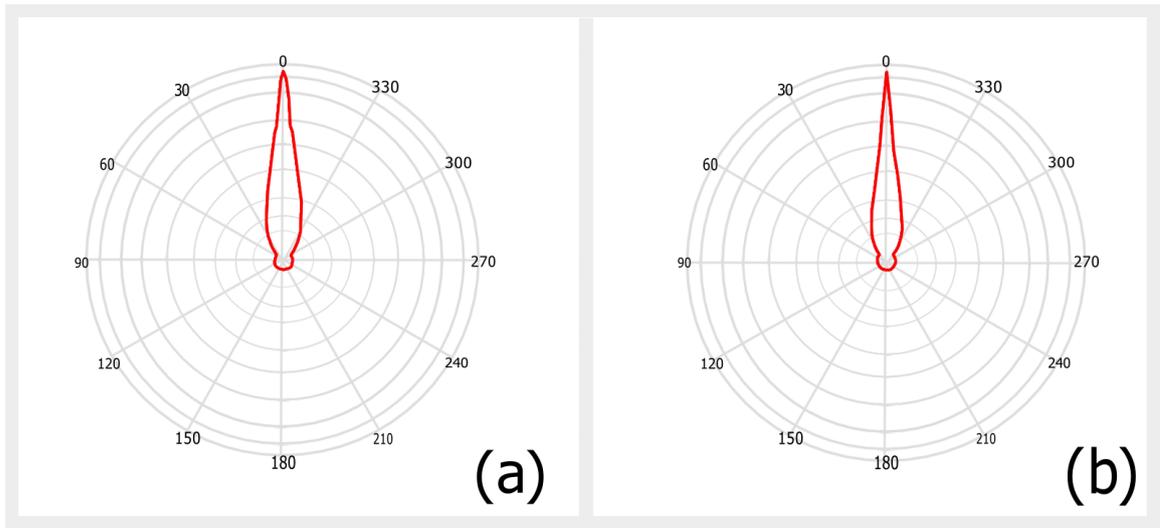


Figura 4.1: Diagrama de radiação ITU-R F.699 para ganhos de (a) 36,6 dBi e (b) 42 dBi.

de potência do ruído térmico N sobre o receptor FS, em dB. O valor I/N deve estar abaixo de -10 dB para cenários de estudo de compartilhamento ou de compatibilidade de espectro, onde o FS atua como vítima. Este limiar irá estabelecer a distância mínima necessária para proteção do sistema FS.

4.2.2 Rede 5G

Na rede 5G configurou-se os parâmetros mostrados na Tabela 4.2, os quais são baseados na Recomendação ITU M.2101-0 [44] e nos estudos apresentados em [7, 12]. Nesta análise, o sistema 5G foi composto por uma BS de altura de 6 m e UEs com altura de 1,5 m. Utilizou-se raio da célula de 100 m e largura banda do sistema definida de 200 MHz. Na configuração da antenas, adotou-se MIMO 8 x 8 na BS e 4 x 4 na UE. O padrão de radiação utilizado é *beamforming*, com ganho máximo de 23 dBi para antena da BS e 17 dBi para o UE, com ganho de 5 dBi por elemento de antena. A Figura 4.2 apresenta o diagrama de radiação com ganhos para BS e UE utilizados neste trabalho.

4.3 Modelos de Propagação

Neste trabalho, são utilizados os modelos de propagação ITU-R P.452-16, combinado ao modelo ITU-R P.2108-0, cujo os parâmetros baseado em [7, 21] estão listados na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Parâmetros de configuração para rede 5G.

Parâmetros	IMT-2020	
	BS	UE
Frequência	26 GHz	
Distância entre BS e UE	100 m	
Configuração de antena	8x8 elementos	4x4 elementos
Altura das antenas	6 m	1,5 m
Ganho máximo da antena	23 dBi	17 dBi
Largura de banda	200 MHz	
Padrão de radiação	<i>Beamforming</i>	
Largura de feixe horizontal/vertical de 3 dB de único elemento	65°	90°
Relação frente-trás horizontal/vertical	30 dB	25 dB
Ganho por elemento	5 dBi	
Perda corporal	-	4 dB
Espaçamento de elementos horizontal/vertical	0,5 λ	0,5 λ
<i>Downtilt mecânico</i>	10°	-
Polarização de antena	Linear +/-45°	Linear +/-45°
Perda ohmica de matriz	3 dB	
Potência conduzida (antes da perda ohmica) por elemento de antena	10 dBm/200 MHz	

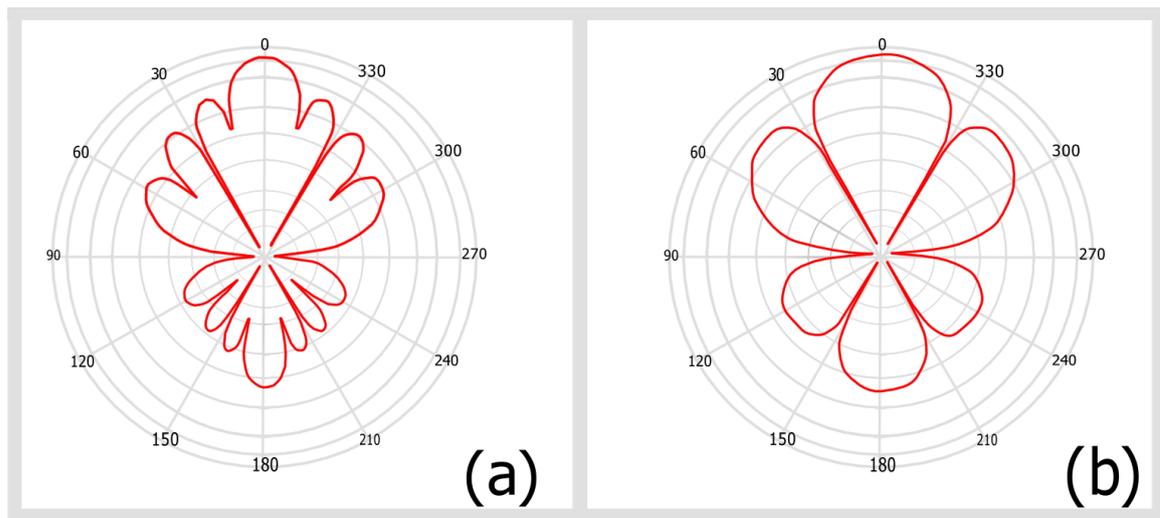


Figura 4.2: Diagrama de radiação de *beamforming*. (a) ganho de 23 dBi na BS. (b) ganho de 17 dBi no UE.

4.4 Análise de coexistência

Em um primeiro momento, para assegurar que ambos os sistemas investigados apresentem resultados consistentes para avaliação de outros cenários, foi realizada uma **Validação das simulações no SEAMCAT**. Estas validações consistiram na reprodução alguns dos casos investigados em [7, 21], que realizam análise de interferência pelo método de *minimum coupling loss* (MCL), que é um método simples para o cálculo dos requisitos mínimos para compartilhamento de espectro entre diferentes sistemas, sendo representado na Figura 4.3. A partir destes resultados, novas análises passam a ser consideradas, principalmente o estudo de múltiplos interferentes.

A **altura para antenas FS** ficou estabelecida em 30 m para avaliação dos sub casos deste trabalho. Outras alturas também são averiguadas, como 15 m e 60 m, para se obter uma análise expandida de determinados sub casos. O **impacto da variação de potência de transmissão** é investigado para averiguar como o nível de potência do sistema 5G interfere sobre o sistema FS. Esta variação da potência de transmissão BS 5G, de 23 dBm a 46 dBm, segue os valores de acordo com a Recomendação ITU-R M.2292-0 [45].

A investigação sobre **impacto da variação de número de células e setores 5G** averiguou como o aumento no número de BS interferentes afetam no estabelecimento da distância de proteção interferência necessária em relação ao cenário considerando MCL. Esta análise é útil para análise de um cenário mais próximo da realidade.

A Figura 4.4 exemplifica uma das proposta para a topologia de cenário com múltiplos

Tabela 4.3: Parâmetros utilizados nos modelos propagação ITU-R P.452-16 e P.2108-0.

Parâmetros para ITU-R P.452-16 [7]	
Porcentagem de tempo necessário para a qual a perda de transmissão calculada não seja excedida	20 %
Perfil (metros acima da média do nível do mar)	Perfil amplo (altura zero)
Zona (costeira, interior ou marítima)	Interior
Latitude da estação Tx	47 graus
Latitude da estação Rx	47 graus
Padrão de radiação de antena das estações Tx e Rx na direção do horizonte em dBi	ITU-R M.2101 ITU-R F.699
Taxa média de índice de radiofrequência através dos 1 km mais baixos da atmosfera	50- unidades/km
Refração do nível do mar	301
Distância em terra das antenas de transmissão e recepção para a costa	500 km
Pressão de ar seco	1013,15 <i>hPa</i>
Temperatura do ar	20 graus C
Polarização do sinal	Vertical
Parâmetros para ITU-R P.2108-0 [21]	
Porcentagem de locais	1 %

interferentes. O *cluster* 5G contém 7 células, com uma BS e uma UE por célula. Cada célula apresenta um raio de 100 metros de distância da BS e único setor. Em outra topologia, são utilizadas 3 setores por célula, com base no padrão especificado pela 3GPP [5]. Observa-se na Figura 4.6 e 4.5 a estrutura da célula com 3 setores e a topologia de 7 células com 3 setores, respectivamente. Nesta configuração, o sinal terá um aumento de alcance [46], sendo este valor o dobro do raio da célula [5], sendo que cada setor terá uma emissão individual, comportando-se como uma pequena célula dentro dentro de um *cluster*, aumentando o sinal interferente sobre o sistema vítima. Em ambos os casos, são calculado a interferência agregada do *cluster* 5G sobre o sistema FS. A escolha desse cenário é conveniente para estudos, uma vez que o uso de múltiplas células 5G será de uso recorrente em sistemas 5G, visto que é uma topologia típica para redes 5G usado em cenários de coexistência com outros serviços [14, 15, 37, 47, 48].

A investigação do **impacto da variação de ganho das antenas FS**, realiza uma análise para aferir o impacto da configuração do ganho no receptor FS na distância de proteção

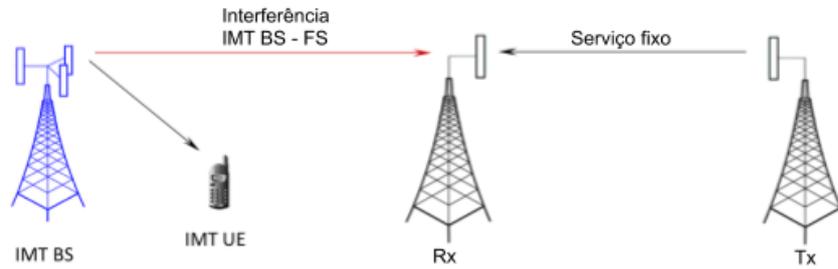


Figura 4.3: Cenário de coexistência entre única célula 5G e um FS ponto-a-ponto em *downlink* [7].

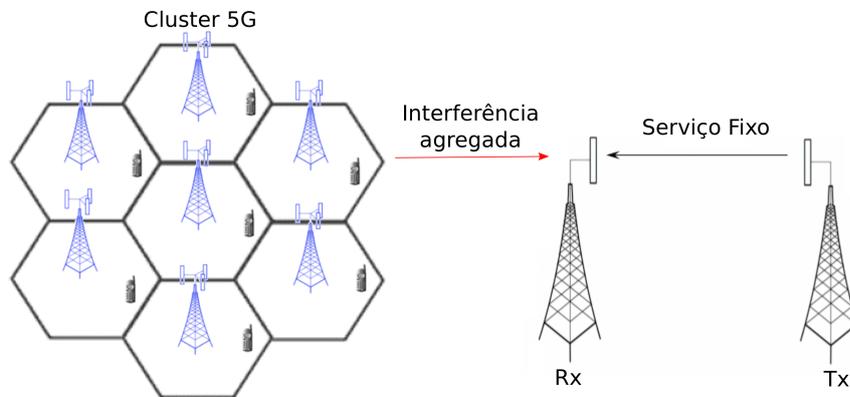


Figura 4.4: Topologia de 7 células 5G com único setor e sistema FS ponto-a-ponto.

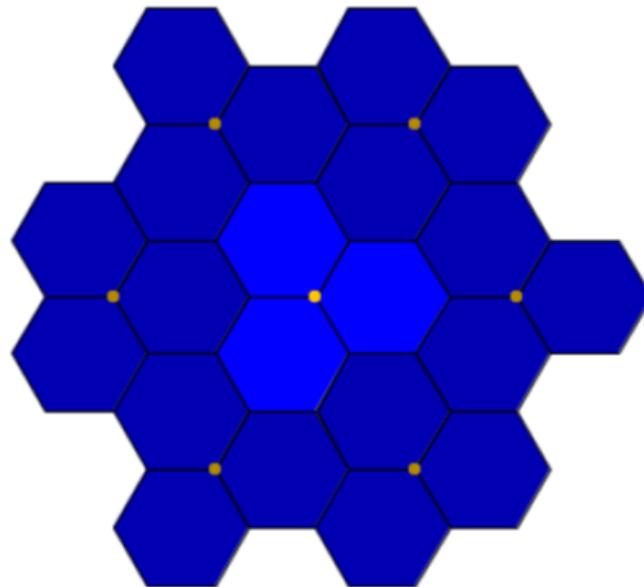


Figura 4.5: Topologia de 7 células 5G com 3 setores cada.

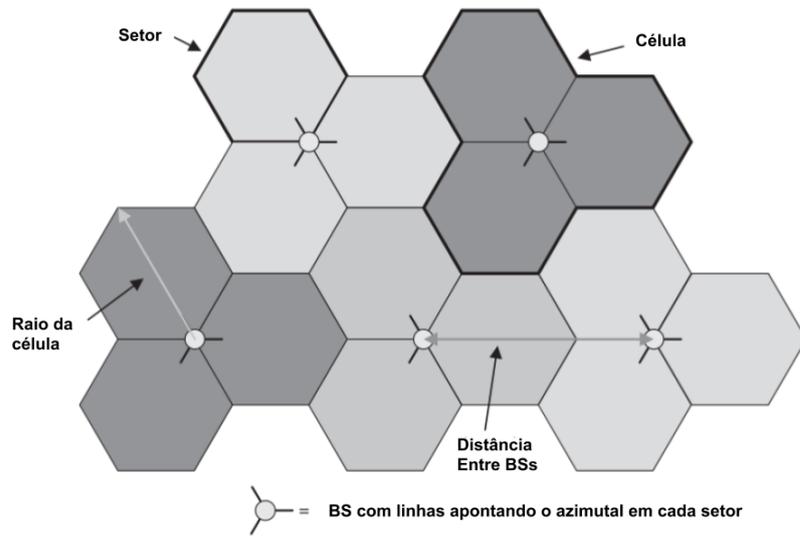


Figura 4.6: Estrutura de uma célula com 3 setores. Fonte: [8].

para ganhos de 31,5 dBi e 48 dBi. Estes valores estão presentes em estudos de coexistência [14, 21], sendo esta averiguação fundamental para planejamento de ganho de FS adequado em cada caso.

Por fim, uma abordagem de cenário *uplink* irá avaliar o **impacto do número de usuários**, considerando 3 valores distintos para números de usuários dispersos pela célula 5G: 21 UE para o caso de 7 células com 1 setor, 30 para o caso de 1 célula com 3 setores e 210 para o caso de 7 células com 3 setores. Estes valores representam valores mínimos e máximos de usuários que podem ser alocados em diferentes topologias. Os UEs serão dispostos aleatoriamente pela células durante as simulações.

Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo, diversos resultados são apresentados com o intuito de evidenciar, por meio de simulações, como o nível de interferência influencia a distância de proteção necessária em cada cenário proposto.

As simulações foram divididas em 2 partes: A primeira consistiu na validação de 3 cenários, cujo objetivo consistia em ajustar os parâmetros de ambos os sistemas modelados no simulador SEAMCAT e compará-los com resultados de outros estudos, de forma a garantir que estes apresentem valores consistentes para que seja feita uma análise de coexistência. A segunda parte consistiu na análise de coexistência, considerando novas topologias de rede e parâmetros e como a alteração destes afetam a interferência.

Em todos os casos avaliados, são consideradas que a rede 5G esteve atuando como sistema interferente e a rede fixa atuando como sistema vítima em cenário macro suburbano, com poucos prédios e árvores e muitas residências. O impacto da interferência co-canal da rede 5G sobre o receptor de FS foi avaliado a partir da relação I/N, que irá definir a distância mínima de coexistência. Também será averiguada a probabilidade de interferência na distância de proteção estabelecida pelo limiar I/N. Esta probabilidade de interferência obtida será apenas para fins de verificação, uma vez que não é possível comparar com outros estudos relacionados.

5.2 Validação das simulações no SEAMCAT

A Figura 5.1 são apresentados os resultados comparativos no simulador em relação aos obtidos nos estudos do grupo suíço em contribuição para a ECC [7], em *downlink*. Nesse cenário, para se alcançar $I/N \leq -10$ dB no receptor de FS, deve-se garantir uma distância

mínima de 22,4 km entre a BS da rede 5G e o receptor de FS (para altura de antena de 15 m). Ao aumentar a altura da antena de FS, a distância de proteção deve ser maior, sendo de 28 km e 38,7 km, para alturas de 30 e 60 m, respectivamente, em razão ao aumento da área de cobertura em relação com aumento de altura das antenas de FS.

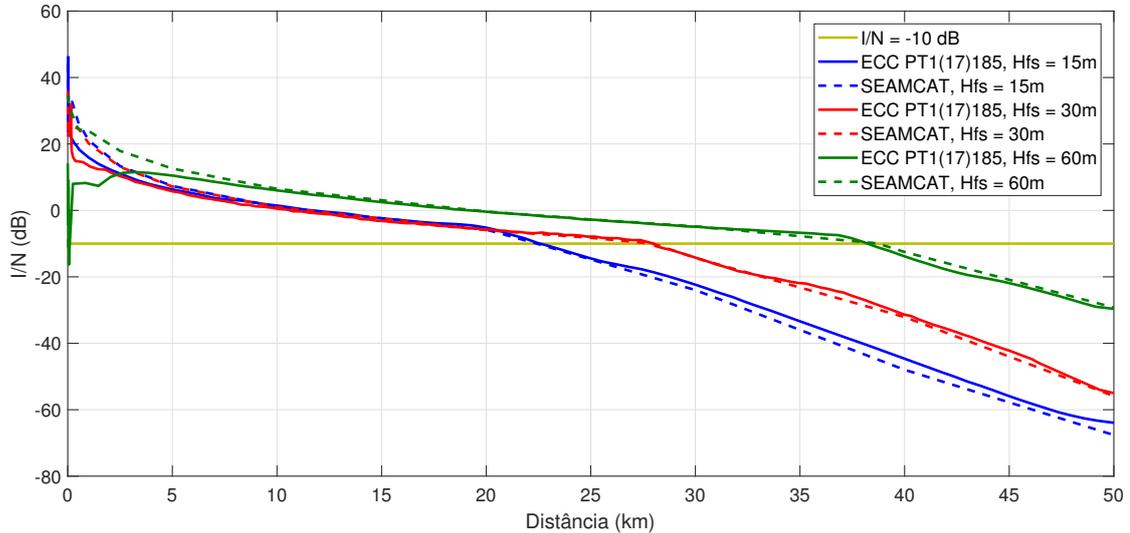


Figura 5.1: Gráfico comparativo entre os resultados obtidos pelo estudo e os resultados obtidos pelo SEAMCAT em cenário *downlink*.

Observa-se que a comparação entre os resultados deste trabalho (simulados no SEAMCAT) com os obtidos pelo grupo suíço são semelhantes, havendo algumas distinções, principalmente para os primeiros valores de altura de antena de 60 m em distâncias menores que 4 km, podendo interpretar estas instabilidades de valores como variabilidade do sinal de interferência sobre FS, por fatores, por exemplo, como sombreamento (variações devido a obstruções por objetos entre o percurso do transmissor e o receptor) e atenuação por multi-percurso (espalhamento dos sinais em múltiplas direções) [49]. Uma vez que os resultados comparados foram realizados em diferentes simuladores, um ou mais parâmetros podem estar sendo considerados ou não para cálculo de interferência. Portanto, definiu-se uma distância de estabilidade a partir de 5 km onde foi possível comparar ambos resultados e validar a modelagem da rede 5G e do FS no SEAMCAT. A finalidade desta etapa é obter resultados consistentes para modelagem e investigação de outros cenários deste trabalho, a partir dos requisitos mínimos de coexistência.

O segundo caso validado trata-se da investigação de diferentes ganhos de FS e sua influência na distância de proteção. Este caso é baseado em outro estudo do grupo suíço da ECC [21], para os quais são estudados a interferência com para ganhos de 31.5 dBi e 48 dBi, em *downlink*, cujo a comparação entre os resultados desse estudo e os obtidos pelo SEAMCAT

estão presentes na Figura 5.2. Mais uma vez, o comportamento em distâncias menores que 5 km divergem do estudo base, sendo considerado novamente os fatores anteriormente citados. Entre os resultados do estudo e os simulados tiveram uma diferença de apenas 0.8 km e 1.1 km para ganhos de 31.5 dBi e 48 dBi respectivamente, portanto, sendo validado para outros testes.

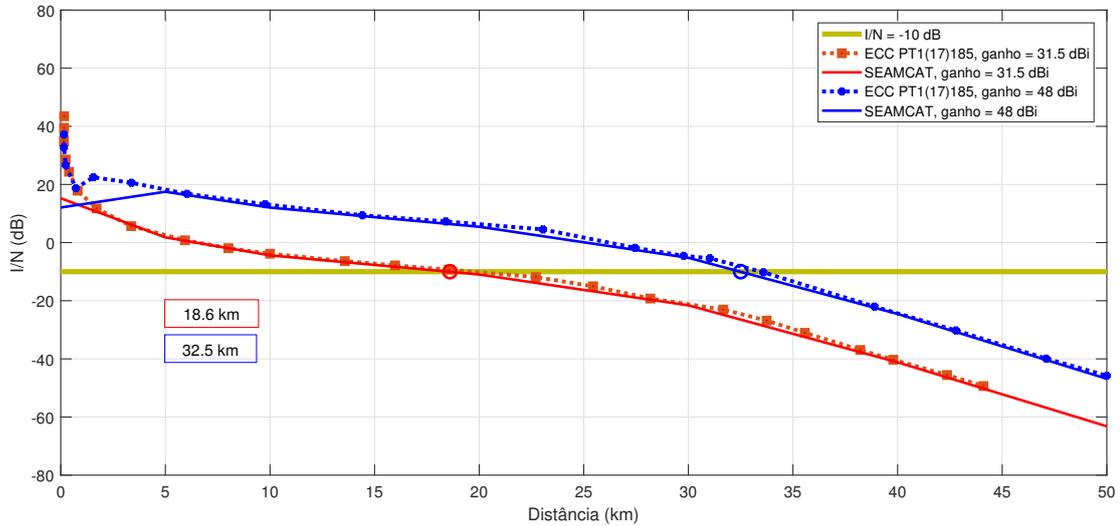


Figura 5.2: Comparativo entre os resultados da variação de ganhos obtidos pelo estudo da ECC e os resultados obtidos pelo SEAMCAT em cenário *downlink*.

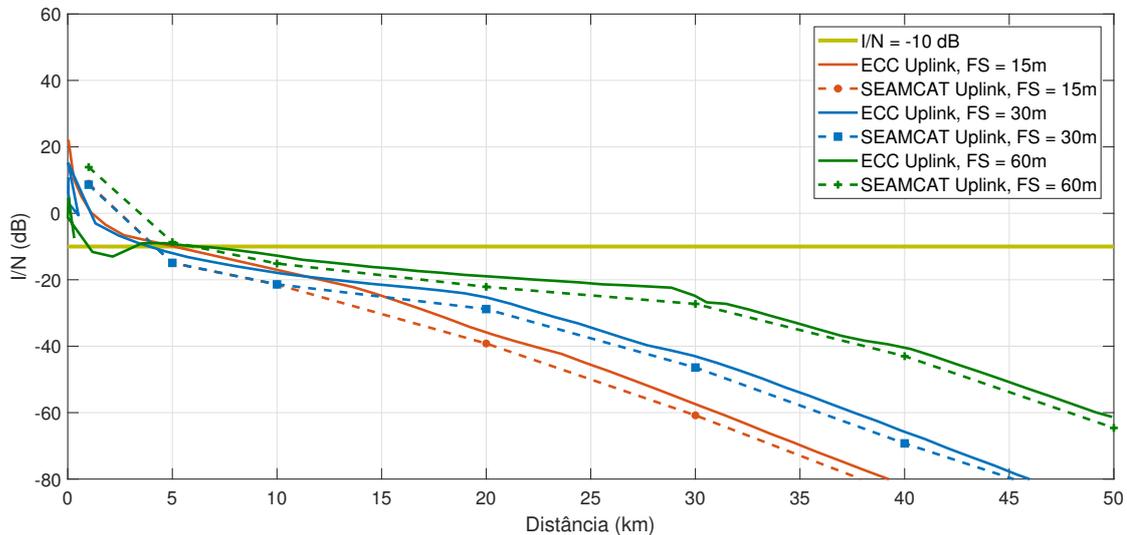


Figura 5.3: Comparativo entre os resultados estudo da ECC para *uplink* com os obtidos pelo SEAMCAT.

Uma última validação foi realizada para o cenário *uplink*, onde o interferente é o usuário. Este caso também é investigado no estudo [7], onde apenas um UE interfere no sistema FS.

Os valores obtidos pelo SEAMCAT foram de 4.17 km (FS = 15 m), 4.16 km (FS = 30 m) e 6.02 km (FS = 60 m) em comparação aos obtidos no estudo de 4 km, 3.8 km e 5.6 km respectivamente. Nesta validação, a distinção foi moderada, atribuindo-se a causa a diferenças entre configurações do caso na investigação da ECC e no SEAMCAT, sendo utilizado estes parâmetros devido a estes estarem mais próximos no estudo referencial. A Figura 5.3 apresenta um comparativo entre os dois resultados.

5.3 Impacto da variação de potência

No primeiro caso deste cenário foi analisado o nível de interferência a partir da relação I/N no decorrer da distância de separação entre uma rede 5G e um sistema ponto-a-ponto. Neste caso, o primeiro parâmetro a ser explorado é a variação dos níveis de potência da transmissão da estação da célula 5G, variando de 23 dBm a 46 dBm, em cenário *downlink*. A Figura 5.4 apresenta uma síntese destes resultados para uma altura de antena fixa de 30 m. Como esperado, a distância de proteção acompanha o aumento da potência da BS. A menor distância obtida é 25 km para uma potência de 23 dBm e a maior é 39.5 km para uma potência de 46 dBm, uma diferença em torno de 14.5 km, apresentando um impacto considerável na distância de proteção, como pode-se observar detalhadamente na Figura 5.4.

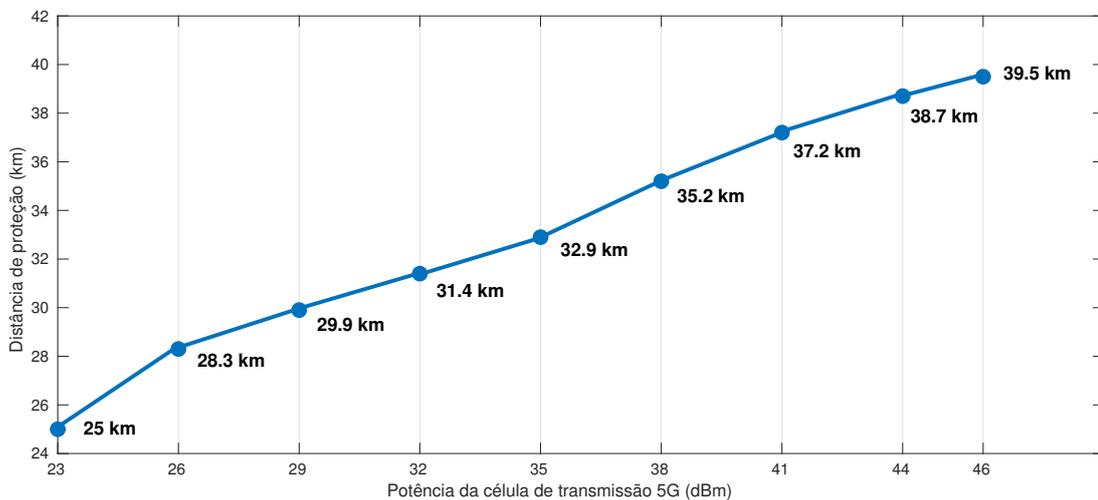


Figura 5.4: Efeito de potência de transmissão da BS 5G sobre a distância de proteção em cenário *downlink*.

Na distância de proteção estabelecida pelo limiar, a probabilidade de interferência é de cerca de 53% para o valor de 23 dBm de potência e de 56% para o valor de 46 dBm de potência. Esta probabilidade tende a cair continuamente com o aumento da distância de proteção entre

os sistemas. Mesmo com uma discreta diferença, a probabilidade de interferência é maior na distância de proteção estabelecida pelo limiar para valores maiores de potência, mostrando o impacto deste parâmetro na rede.

5.4 Impacto da variação do número de células 5G e setores

Na seção de validação, os sistemas em questão apresentam configuração de único transmissor e único receptor, que simplifica a complexidade dos testes porém, é interessante para análise de interferência de um componente isolado e para se obter a distância mínima de proteção. Neste cenário, é investigado o impacto da topologia de 7 células, com 21 setores totais em *downlink*. Dentro desta topologia, a interferência será avaliada a partir da soma das interferências agregadas de todos os enlaces atuantes do sistema interferente sobre o receptor vítima. As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam uma síntese dos resultados de coexistência para diferentes alturas de antena de FS.

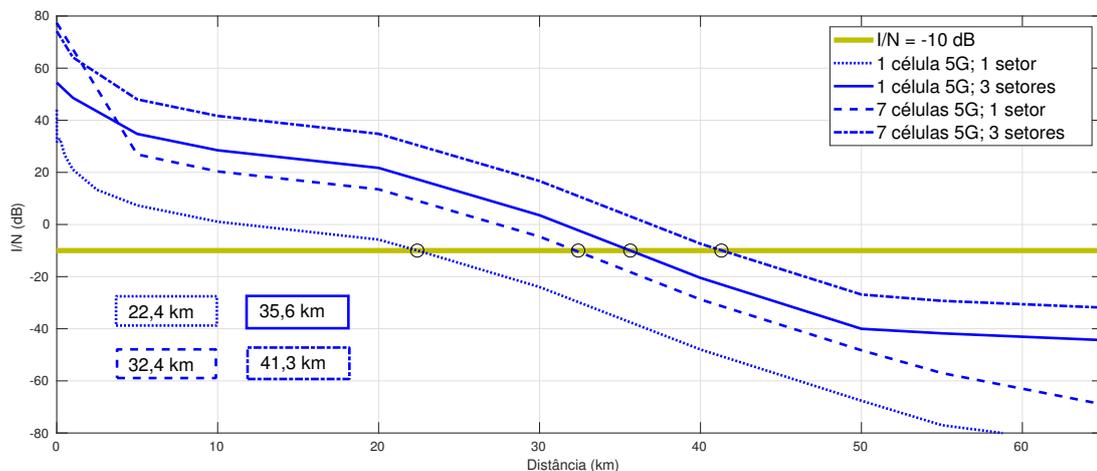


Figura 5.5: Efeitos de diferentes topologias de redes 5G sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 15 m em cenário *downlink*.

Neste caso, é investigado a interferência das BSs 5G sobre o receptor FS. Observa-se um aumento proporcional de interferência, de acordo com o aumento do número de células e setores.

Para o cenário de altura de antena FS = 15 m, ao adicionar mais setores em uma única célula, a distância de proteção aumenta de 22,4 km para 35,6 km. Para os sub casos de 7 células, a distância de proteção aumenta de 32,4 km para 41,4 km ao setorizar as células.

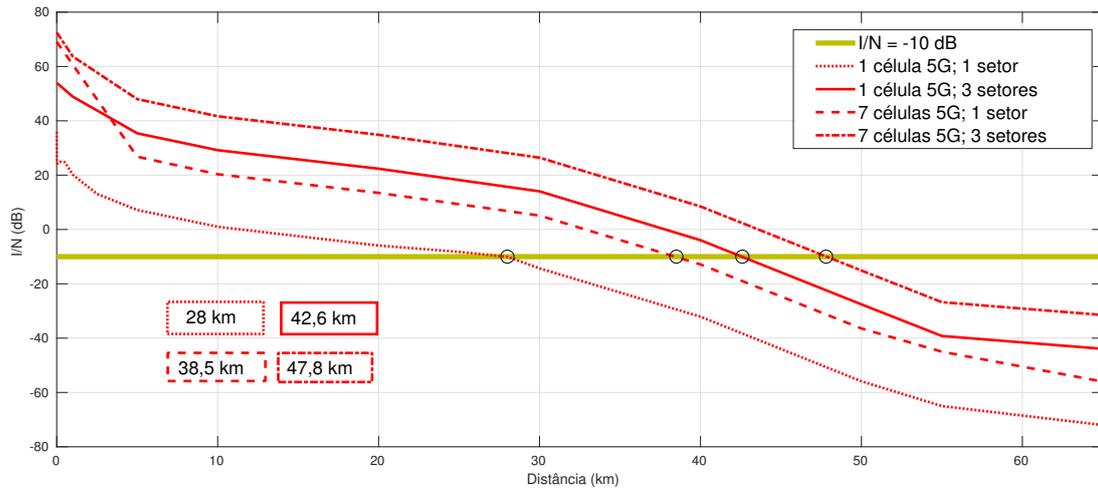


Figura 5.6: Efeitos de diferentes topologias de redes 5G sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 30 m em cenário *downlink*.

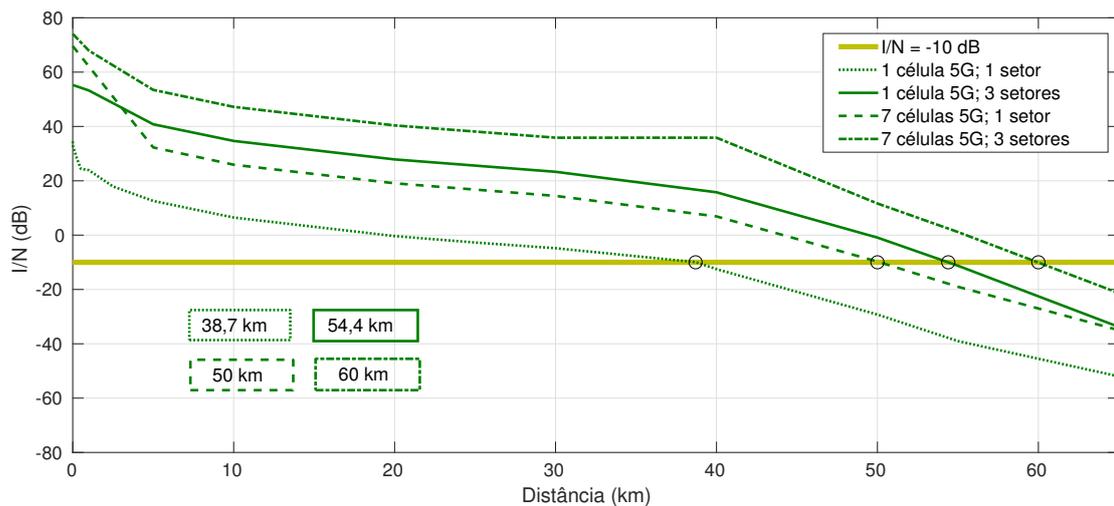


Figura 5.7: Efeitos de diferentes topologias de redes 5G sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 60 m em cenário *downlink*.

Neste cenário, A média da probabilidade de interferência no limiar I/N é de aproximadamente 56%.

Para o cenário de altura de antena FS = 30 m, a distância aumenta de 28 km para 42,6 km ao adicionar 3 setores a uma célula. Para os sub casos de 7 células, a distância aumenta de 38,5 km para 47,8 km na topologia setorizada. A média da probabilidade de interferência neste cenário é de aproximadamente 55%.

De modo similar cenários anteriores, para altura de antena FS = 60 m, a distância aumenta de 38,7 km para 54,4 km com a setorização de única célula. Para o caso de 7 células,

a setorização causa um aumento na distância de 50 km para 60 km. A média da probabilidade de interferência neste cenário é de aproximadamente 56%.

Nos 3 cenários, o número de setores causa um aumento ligeiramente maior na distância de proteção em comparação com aumento do número de células com 1 setor. A justificativa para este resultado está relacionada a interferência agregada pelos UEs em cada setor adicionado (1 por setor), uma vez que as mesmas se comportam como novas células.

5.5 Impacto da variação do ganho de antenas FS

Neste caso, foi investigado como a mudança dos ganhos do sistema FS influencia na recepção de interferência em cenário *downlink*. Nesta investigação, foram exploradas 3 alturas de FS e utilizando a topologia de 7 células com 3 setores em cada célula. Para cada sub caso de altura de antena fixa, é feita a simulação para os ganhos de 31.5 dBi e 48 dBi. As Figura 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados das simulações para cada sub caso. Para ganho de 31.5, a distância de proteção é de 31,5 km, 37,6 km e 45,5 km para alturas de FS de 15 m, 30 m e 60 m respectivamente. Ao aumentando o ganho da antena FS de 31.5 dBi para 48 dBi, a distância de proteção necessária aumenta para 38,2 km, 45,4 km e 55,8 km respectivamente.

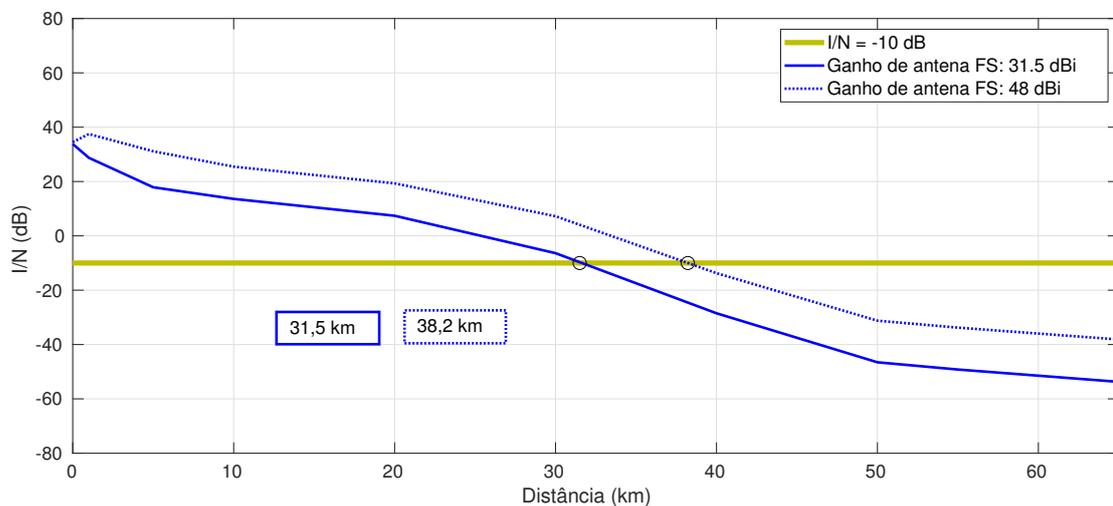


Figura 5.8: Efeitos do ganho de antena FS sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 15 m.

Para estes 3 sub casos, a probabilidade de interferência obtida no limiar de I/N foram de 54%, 55% e 58% para ganho de 31.5 dBi em 15 m, 30 m e 60 m, respectivamente. Para o ganho de 48 dBi, as probabilidades foram 56%, 58% e 56% para alturas de 15 m, 30 m e 60 m, respectivamente.

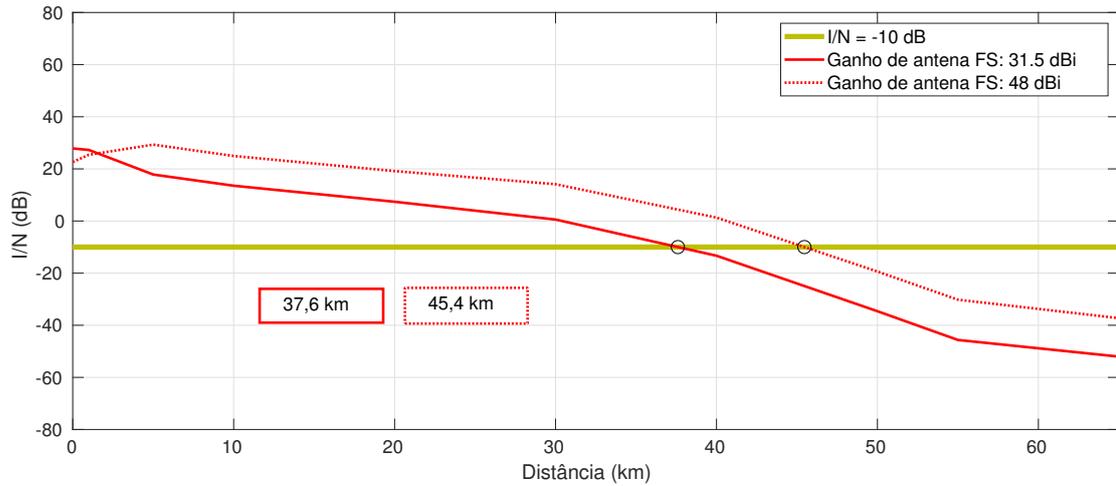


Figura 5.9: Efeitos do ganho de antena FS sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 30 m.

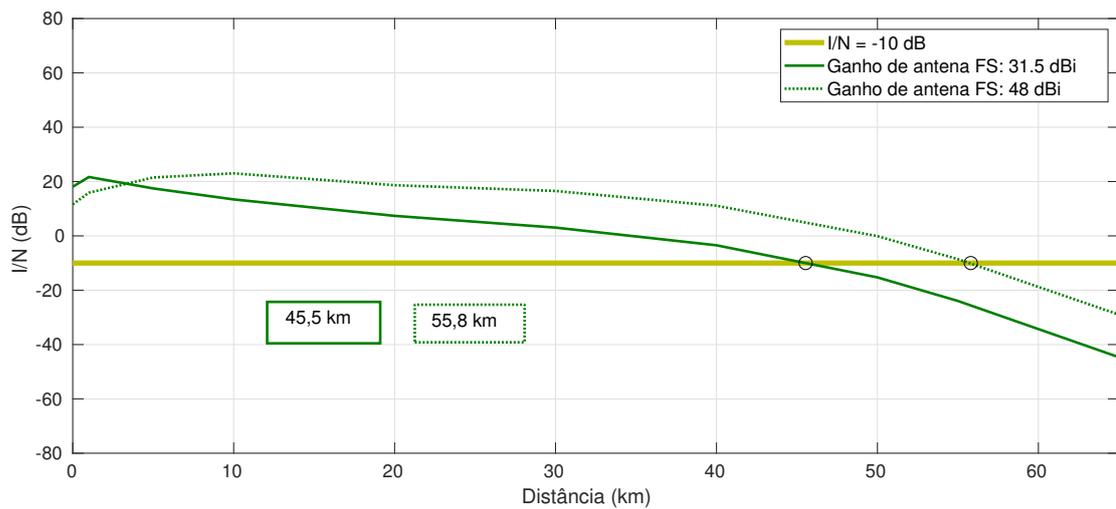


Figura 5.10: Efeitos do ganho de antena FS sobre a distância de proteção para altura de antena FS = 60 m.

Foi observado um aumento na distância de proteção necessária diretamente proporcional ao aumento do ganho de antena FS. Pode-se concluir que este aumento está relacionado com o aumento na recepção do sistema vítima, capaz de captar além do sinal do transmissor, também está mais apto a captar outros sinais externos ao sistema FS.

5.6 Impacto da variação do número de usuários

Nesta análise, foi investigado como o aumento no número de usuários influencia na distância de proteção. A análise considerou um número mínimo e máximo de UEs em cenário *uplink*. Foram averiguados 3 sub casos a serem comparados com o cenário validado na Seção 5.2: Número máximo de usuários para 1 célula com 3 setores; Número mínimo de usuários para 7 células com 3 setores; e número máximo de usuários para 7 células com 3 setores. O número máximo de usuários estabelecido foi 30 por célula, sendo 10 por setor. A simulação foi realizada para altura de antena FS = 30 m. Os resultados para 4 diferentes quantidades de UEs (1, 30, 21 e 210), estão sumarizados na Figura 5.11. A distância de proteção encontrada é de 29,66 km para 30 usuários, 38,08 km para 21 usuários e 47,8 km para 210 usuários. Observa-se que mesmo utilizando apenas 1 célula, a distância de proteção aumenta significativamente quando o número máximo de usuários é configurado. A diferença entre o número mínimo e máximo de usuários é maior para 1 célula do que para 7 células. A probabilidade de interferência obtida no liminar de I/N foram respectivamente, 54%, 54% e 57%

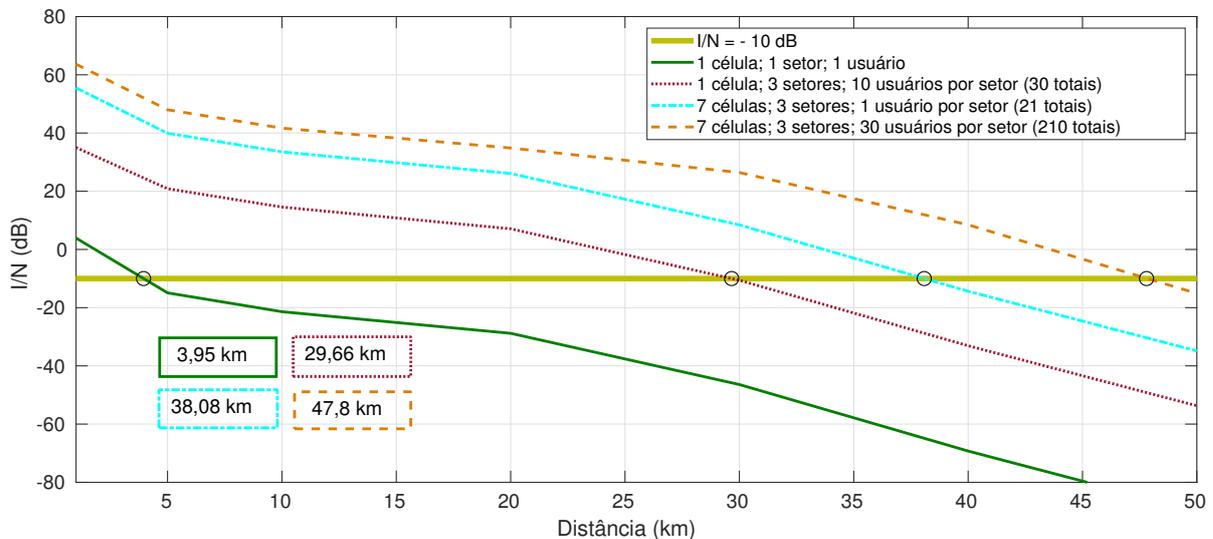


Figura 5.11: Comparativo do impacto de interferência com número mínimo e máximo de usuários por célula em cenário *uplink*.

5.7 Conclusão

No primeiro cenário, houve a análise da variação de potência de uma BS 5G ao longo de um percurso, onde foi observado que a distância de proteção é relativa com a potência de

transmissão, aumento e reduzindo de acordo com a quantidade de potência transmitida, com distância de proteção variando de 25 km a 39.5 km. Embora esta análise tenha sido realizada para uma única BS, ela é importante para estimação de potência para um elemento isolado da rede.

O segundo cenário, a topologia da rede 5G é investigada, variando o número de células e setores para 3 sub casos (3 alturas diferentes de antena FS). Em todos os sub casos, a topologia com 3 setores foram os que requisitaram maiores distâncias de proteção, em relação a um único setor. O número de setores em uma única célula apresentou valores de distância de proteção próximos aos simulados com número maior de células de apenas 1 setor. A utilização de setores causam um aumento no alcance do sinal devido ao sinal transmitido ser mais diretivo na posição do usuário alvo, mostrando o impacto desta topologia de 3 setores na produção de interferência. Foi observado também que altura de antena do FS apresenta impacto significativo na distância de proteção, necessitando de maiores distâncias de proteção a medida que aumenta a altura da antena. O aumento da altura de antena fixa causa uma redução na perda de propagação, uma vez que as obstruções sofridas pelo sinal são reduzidas, porém acaba por receber mais sinal de interferência. A investigação deste cenário é fundamental para o entendimento do comportamento de sistema 5G realístico para coexistência.

O terceiro cenário, foi investigada como a variação de ganho na antena receptora FS afeta na distância de proteção, realizando simulações . É utilizada a topologia de rede 5G com 7 células com 3 setores cada para 3 sub casos (3 alturas diferentes de antena FS). Os resultados mostraram um aumento da distância de proteção com o aumento no ganho nos 3 sub casos, embora este valor não seja tão expressivo quanto a variação da potência e de células. Este aumento pode estar relacionado no aumento da recepção dos sinais internos e externos ao sistema FS com o aumento do ganho. Também observa-se que a variação de I/N neste cenário é aproximadamente a diferença entre os ganhos da antena.

No quarto cenário, foi investigado como a variação do número de usuários afeta a distância de proteção, realizando simulação para um número mínimo e máximo de usuários permitido pela ferramenta de simulação. Esta análise foi feita a comparação entre 1, 30, 21 e 210 usuários totais, sendo aplicada tanto a topologia de única célula com único setor quanto 7 células com 3 setores. Foram observados que o impacto da interferência agregada provocou um aumento na distância de separação necessária nos sub casos com número maior de usuários, fazendo uma ressalva para o sub caso de 30 e 21 usuários totais, onde mesmo que no sub caso de 1 célula com 3 setores tenha 30 UEs totais, o sub caso de 7 células com 3 setores, com 21 UEs totais, apresenta uma distância de proteção maior devido ao uso de setores. Como dito anteriormente, a setorização causa um aumento do alcance do sinal devido a diretividade do

signal transmitido, mostrando o impacto desta topologia nas simulações realizadas.

Os resultados obtidos e as probabilidades de interferência no limiar I/N estão sumarizados na Tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5.1: Resumo dos resultados.

Parâmetro avaliado	Sistema Interferente	Sistema Vítima	Altura de antena FS (m)	Topologia da rede 5G	Sub caso	Probabilidade de interferência (%)	Distância de proteção (km)
Potência BS 5G	Rede 5G	Sistema Fixo	30	1 célula / 1 setor	23 dBm	53	25
					46 dBm	56	39,5
Número de células 5G e setores	Rede 5G	Sistema Fixo	15	1 célula/ 3 setores		56	35,6
				7 células/ 1 setor			32,4
				7 células/ 3 setores			41,4
			30	1 célula/ 3 setores		55	42,6
				7 células/ 1 setor			38,5
				7 células/ 3 setores			47,8
			60	1 célula/ 3 setores		56	54,4
				7 células/ 1 setor			50
				7 células/ 3 setores			60
Ganho de antena FS	Rede 5G	Sistema Fixo	15	7 células/ 3 setores	31,5 dBi	54	31,5
			30			55	77,6
			60			58	45,5
			15		48 dBi	56	38,2
			30			58	45,4
			60			56	55,8
Número de usuários	Rede 5G	Sistema Fixo	30		21 usuários	54	38,08
					30 usuários	54	29,66
					210 usuários	57	47,8

Conclusões

Nesta dissertação foi abordado o estudo de coexistência entre redes 5G e FS ponto-a-ponto na faixa de 26 GHz. Foram analisados o impacto de interferência de co-canal de uma rede 5G em um sistema ponto-a-ponto, com ambos operando na faixa de 26 GHz, tanto para *downlink* quanto para *uplink*, variando parâmetros como potência, ganho na antena FS receptora, número de células, setores e usuários.

Em sistemas com topologias de um cenário próximo a realidade, com muitas células e muitos usuários, a distância de proteção necessária superou valores de 30 km até valores próximos a 60 km. Para análise de parâmetros específicos de sistema, ganho de antena FS e potência da BS, a distância também aumenta diretamente com o aumento destes parâmetros, porém em uma escala mais sutil, com valores entre 25 km a 55 km, como esperado. A distância de proteção obtida a partir do número máximo de usuários (210 UEs) e de ganho de antena FS máximo (48 dBi) apresentaram impacto quase similares, com a diferença aproximada de 2,4 km. A altura de antena FS também é um fator importante a ser considerado. Alturas elevadas de FS foram as que exigiram distância de proteção maior, o que acaba não se tornando ideal quando se precisa alocar muitos serviços em uma mesma área geográfica, como macro suburbana.

Também foi observado que na distância de proteção obtida a partir do limiar I/N, a probabilidade de interferência nos casos estudados apresentou variação entre 54% a 59%. Estes valores representam que mesmo com estes percentuais de probabilidades, o sinal interferente está dentro de níveis aceitáveis, de acordo com o limiar I/N estabelecido pela Recomendação ITU-R F.758-6 [43]. Estes valores podem ser utilizados para novas análises e estudos de critérios de operação destes sistemas.

Os resultados destas análises mostraram que o compartilhamento de espectro entre sistemas FS e redes 5G na banda de 26 GHz dependem fortemente dos cenários e dos parâmetros de rede para estabelecer e gerenciar as condições de compartilhamento para garantir a coexistência na mesma faixa. Neste trabalho, foi possível averiguar quais destes parâmetros

de ambos sistemas que mais impactam na distância de proteção. Ademais, a modelagem de ambos os sistemas no SEAMCAT apresentou resultados consistente aos resultados do estudo utilizado como base para este trabalho. Assim, espera-se que novos cenários de coexistência poderão ser abordados com estas configurações, de forma a contribuir com os estudos de desenvolvimento de redes 5G.

Visando a continuidade do trabalho desenvolvido, a seguir, são sugeridos alguns tópicos para trabalhos futuros:

- Abordagem com outros sistemas interferentes e vítimas e novas configurações de sistemas para análise de interferência co-canal e canal adjacente;
- Estudo de coexistência em outras porções do espectro de ondas milimétricas e/ou outras abordagens de cenários (*indoor*, micro urbano, etc.);
- Investigação sobre outros modelos de propagação voltados ao 5G e o impacto deste parâmetro no sistema 5G na condição de interferente.

Publicações Oriundas da Pesquisa

1. TEIXEIRA, Fátima P. A.; FREITAS, Lilian C.; COSTA, J. C. W. A. Interference analysis between 5G mobile networks and fixed services in the 26 GHz band. IESTEC 2019 - VII International Engineering Science and Technology Conference 2019. October 9-11, 2019 - Panama City, Panama.
2. TEIXEIRA, Fátima P. A.; FREITAS, Lilian C.; COSTA, J. C. W. A. Spectrum sharing between 5G networks and fixed services operating in millimeter-waves. IMOC 2019 - International Microwave and Optoelectronics Conference 2019. November 10-14, 2019 - Aveiro, Portugal.
3. TEIXEIRA, Fátima P. A.; FREITAS, Lilian C.; COSTA, J. C. W. A. Exploring 5G Coexistence Scenarios. ENCOM 2019 - IX Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação. October 18 a 20, 2019 - Petrolina, Brasil.

Referências

- [1] DAHLMAN, E. et al. 5G Wireless Access: Requirements and Realization. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, p. 42–47, 2014.
- [2] GSMA-TMG. *Study on Socio-Economic Benefits of 5G Services Provided in mmWave Bands*. Disponível em: <<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/06/mmWave-5G-benefits.pdf>>. Acesso em: 28 de Junho de 2019.
- [3] AL-FUQAHA, A. et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, Fourthquarter 2015.
- [4] HUANG, K.; WANG, Z. *Millimeter wave communication systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 9780470404621.
- [5] SEAMCAT Handbook. Disponível em: <<http://www.ero.dk/4494FE08-FE9C-4E0A-BD13-159B749DA6A1>>. Acesso em: 09 de Abril de 2019.
- [6] DÉVENDEC, M. L.; RÉFIK, A. The Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool (SEAMCAT). In: *International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC 2002)*. [S.l.: s.n.], 2002.
- [7] ECC Project Team 1. *Complementary Co-existence Studies of IMT 2020 and Fixed Service in the 26 GHz Band*. [S.l.], 2017.
- [8] PAHL, J. *Interference Analysis : Modelling Radio Systems for Spectrum Management*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 1119065313.
- [9] ITU-R. *Radiocommunication Study Groups*. 2016. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/gen/R-GEN-SGB-2016-PDF-E.pdf>. Acesso em: 22 Maio de 2019.
- [10] LIU, G. et al. 5G Features from Operation Perspective and Fundamental Performance Validation by Field Trial. *China Communications*, v. 15, p. 33–50, 2018.

-
- [11] FCC 17-152. *Use of Spectrum Bands Above 24 GHz For Mobile Radio Services*. [S.l.], 2016.
- [12] ITU-R M.2410-0, R. *Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s)*. [S.l.], 2017.
- [13] ITU Resolution 238. *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*. [S.l.], 2015.
- [14] HASSAN, W. A.; JO, H.; THAREK, A. R. The feasibility of coexistence between 5G and existing services in the IMT-2020 candidate bands in Malaysia. *IEEE Access*, v. 5, p. 1486714888, 2017.
- [15] KIM, S. et al. Coexistence of 5G with the incumbents in the 28 and 70 GHz bands. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, v. 6, p. 12541268, 2017.
- [16] RAPPAPORT, T.; MACCARTNEY, G.; MELLIOS, E. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, v. 65, 2017.
- [17] ANATEL. *Anatel fala sobre tecnologia 5G na Câmara dos Deputados*. 2019. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2265-anatel-fala-sobre-tecnologia-5g-na-camara-dos-deputados>>. Acesso em: 22 de Maio de 2019.
- [18] MATE, D. M. *Estudo de Interferência entre Sistemas LTE e de TV Digital em Canal Adjacente na Faixa de 700 MHz*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2014.
- [19] OKAMOTO, D. M. *Análise da Coexistência entre TV Digital e LTE na Faixa de 700 MHz - Medidas e Simulações*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.
- [20] SUN, S. et al. Propagation path loss models for 5G urban micro-and macro-cellular scenarios. In: *IEEE 83rd Veh. Technol. Conf.* [S.l.: s.n.], 2016.
- [21] Radiocommunication Study Groups. *Co-existence Studies of IMT 2020 and Fixed Service in the 26 GHz Band*. [S.l.], 2017.

-
- [22] Recommendation ITU-R M.2083. *IMT Vision Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. [S.l.], 2015.
- [23] ZHU, C. et al. Green internet of things for smart world. *IEEE Access*, v. 3, p. 2151–2162, 2015.
- [24] LAURIDSEN, M. et al. Ensuring Energy Efficient 5G User Equipment by Technology Evolution and Reuse. In: *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- [25] JAVAID, N. et al. Intelligence in IoT-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, v. 56, n. 10, p. 94–100, Out 2018.
- [26] ANATEL. *Anatel aprova Agenda Regulatória 2019-2020*. 2019. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article?id=2228>>. Acesso em: 22 de Maio de 2019.
- [27] ITU-R M.2411-0, R. *Requirements, Evaluation Criteria and Submission Templates for the Development of IMT-2020*. [S.l.], 2017.
- [28] ITU-R M.2412-0 Report. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*. [S.l.], 2017.
- [29] DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *5G NR : the next generation wireless access technology*. [S.l.]: Academic Press, 2018. ISBN 978-0128143230.
- [30] HOEFEL, R. Ieee 802.11ac: A Performance Assessment of Single-User Transmit Beamforming and Multi-User MIMO Transceiver Architectures. In: *ISWCS 2013; The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5.
- [31] WEI, L. *Wideband beamforming : concepts and techniques*. [S.l.]: Wiley, 2010. ISBN 978-0470713921.
- [32] AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, 2016.
- [33] SALOUS, S. et al. Millimeter-wave propagation: Characterization and modeling toward fifth-generation systems. [wireless corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 58, n. 6, p. 115–127, Dez 2016.

-
- [34] Recommendation ITU-R P.452-16. *Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*. [S.l.], 2015.
- [35] Recommendation ITU-R P.676-11. *Attenuation by atmospheric gases*. [S.l.], 2016.
- [36] Recommendation ITU-R P.2108-0. *Prediction of clutter loss*. [S.l.], 2017.
- [37] Tercero, M. et al. Coexistence Between 5G and Fixed Services. In: *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.
- [38] ANATEL. *Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil*. [S.l.], 2018. Processo n. 53500.084119/2017-17.
- [39] Report ITU-R SM.2028-2. *Monte Carlo Simulation Methodology for the Use in Sharing and Compatibility Studies Between Different Radio Services or Systems*. [S.l.], 2017.
- [40] Recommendation ITU-R F.699. *Reference Radiation Patterns for Fixed Wireless System Antennas for Use in Coordination Studies and Interference Assessment in the Frequency Range from 100 MHz to 86 GHz*. [S.l.], 2018.
- [41] HASSAN, W. et al. Spectrum-Sharing Method for Co-Existence Between 5G OFDM-Based System and Fixed Service. *IEEE Access*, v. 7, p. 77460–77475, 2019.
- [42] Recommendation ITU-R F.755-2. *Point-to-multipoint systems in the fixed service*. [S.l.], 1999.
- [43] Recommendation ITU-R F.758-6. *System Parameters and Considerations in the Development of Criteria for Sharing or Compatibility Between Digital Fixed Wireless Systems in the Fixed Service and Systems in Other Services and Other Sources of Interference*. [S.l.], 2015.
- [44] Recommendation ITU-R M.2101. *Modelling and Simulation of IMT Networks and Systems for Use in Sharing and Compatibility Studies*. [S.l.], 2017.
- [45] Recommendation ITU-R M.2292-0. *Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses*. [S.l.], 2013.
- [46] SAGHAEI, H. A novel Architecture for Antenna Arrangement in Wireless Cellular CDMA Systems. *ArXiv*, abs/1208.4392, 2012.
- [47] SON, H.; CHONG, Y. Coexistence of 5G System with Fixed Satellite Service Earth Station in the 3.8GHz Band. In: *2018 International Conference on Information and CFommunication Technology Convergence (ICTC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1070–1073.

- [48] REBATO, M.; POLESE, M.; ZORZI, M. Multi-Sector and Multi-Panel Performance in 5G mmWave Cellular Networks. In: *2018 IEEE Global Communications Conference: Communication QoS, Reliability and Modeling (Globecom2018 CQRM)*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [49] FONTAN, F. P.; ESPIÑEIRA, P. M. *Modeling the wireless propagation channel : a simulation approach with Matlab*. [S.l.]: Wiley, 2008. ISBN 978-0470727850.
- [50] ANATEL. *Atribuição de Faixas de Frequências no Brasil*. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/setorregulado/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>>. Acesso em: 04 de Agosto de 2019.

