

EDUARDO HIROSHI MURAKAMI

Convivência entre sistema móvel de 5ª geração com o serviço de
exploração da terra por satélite passivo – (*EESS Passivo*)

São Paulo
2022

EDUARDO HIROSHI MURAKAMI

Convivência entre sistema móvel de 5ª geração com o serviço de exploração da terra por satélite passivo – (*EESS Passivo*)

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Cezar Trintinalia

Co-orientador:
Dr. Agostinho Linhares de Souza Filho

São Paulo
2022

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

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

São Paulo, 23 de MAIO de 2022

Assinatura do autor: Eduardo Hiroshi

Assinatura do orientador: Prof. Dr. Luiz

Catálogo-na-publicação

MURAKAMI, EDUARDO HIROSHI

Convivência entre sistema móvel de 5ª geração com o serviço de exploração da terra por satélite passivo – (EESS Passivo) / E. H. MURAKAMI -- versão corr. – São Paulo, 2021.

136 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Telecomunicações 2.Telecomunicações por satélite 3.Telefonia celular 4.Telefonia móvel 5.Meteorologia com satélite I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

EDUARDO HIROSHI MURAKAMI

Convivência entre sistema móvel de 5ª geração com o serviço de
exploração da terra por satélite passivo – (*EESS Passivo*)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

São Paulo
2022

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, Tomoiuki (*in
memorian*) e Tomie (*in memorian*), à minha
esposa, Fernanda, e à minha filhinha, Bárbara.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Cezar Trintinalia, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Ao meu co-orientador, Dr. Agostinho Linhares de Souza Filho, pelos valiosos ensinamentos e orientação que enriqueceram meu trabalho e que permitiram que pudesse ser concluído.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin (*in memoriam*), pela oportunidade, valiosas orientações, dedicação e confiança durante o trabalho até o seu falecimento.

À Profa. Dra. Ana Maria Badiali pelas valiosas colaborações e ensinamentos dedicados.

Aos meus amigos de trabalho da Anatel em São Paulo e Brasília pelo incentivo, aos meus amigos Luciano e Edgar pelo auxílio prestado e a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho.

RESUMO

A Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 (CMR-19) identificou as faixas de frequência 24,25 a 27,5 GHz, 37 a 43,5 GHz, 45,5 a 47 GHz, 47,2 a 48,2 GHz e 66 a 71 GHz para a implantação de redes 5G. Além disso, foram tomadas medidas para garantir proteção dos serviços de exploração de satélites da Terra, incluindo serviços meteorológicos e outros serviços passivos em faixas adjacentes. De acordo com (1), interferência é o efeito de energia indesejada devido a uma ou a uma combinação de emissões, radiações ou induções na recepção em um sistema de radiocomunicação, manifestada por qualquer degradação de desempenho, má interpretação ou perda de informação que poderia ser extraída na ausência de tal energia indesejada. A União Internacional de Telecomunicações (UIT) tem usado o termo convivência com sentido mais amplo do que coexistência (2), que é sobre dois sistemas existirem juntos sem interferir um no outro. Neste trabalho, a coexistência entre as Telecomunicações Móveis Internacionais (IMT) na banda de 26 GHz e o Serviço de Exploração da Terra por Satélite Passivo (EESS Passivo) é analisada utilizando a ferramenta de simulação SHARC com base nas características dos sensores EESS Passivo e dos sistemas IMT-2020. Especificamente, foram reproduzidas as simulações das interferências agregadas de Estações Rádio Base e usuários do sistema IMT para os sensores do EESS Passivo, considerando a perda por *clutter* na propagação, perdas por entradas em edifícios e por atenuação na atmosfera. Os estudos foram realizados seguindo o método de Monte Carlo, na qual, durante cada iteração, um número de estações IMT-2020 é distribuído na área de estudo e o nível de interferência agregada gerada pelas mesmas no outro sistema é calculado. Para a caracterização dos sistemas, foram estudadas as características dos sensores do EESS (Passivo) e dos sistemas IMT-2020, Sistemas de Antenas Avançado (AAS), *Beamforming* e a formação de *grating lobes*. Demonstra-se que as avaliações que embasaram as decisões da WRC-19 podem ser o suficiente para determinar critérios de proteção adequados para o EESS (Passivo). Assim, propõe-se nesta Dissertação avaliar a alteração de parâmetros de entrada nos estudos de convivência entre sistemas IMT e EESS (Passivo).

Palavras chave: 5G, Convivência, EESS Passivo, IMT-2020, Interferência, Ondas milimétricas, Previsão Meteorológica

ABSTRACT

The 2019 World Radiocommunications Conference (WRC-19) identified the frequency bands 24.25 to 27.5 GHz, 37 to 43.5 GHz, 45.5 to 47 GHz, 47.2 to 48.2 GHz and 66 to 71 GHz for the deployment of 5G networks. Furthermore, measures were taken to ensure protection of Earth's satellite exploration services, including meteorological services and other passive services in adjacent bands. According to (1), interference is the effect of unwanted energy due to one or a combination of emissions, radiations, or inductions upon reception in a radiocommunication system, manifested by any performance degradation, misinterpretation, or loss of information which could be extracted in the absence of such unwanted energy. The International Telecommunication Union (ITU) has used the term sharing/compatibility in a broader context than coexistence (2), which is about two systems existing together without interfering each other. In this work, the coexistence between International Mobile Telecommunications (IMT) in the 26 GHz band and the Earth Exploration Satellite (Passive) Service (EESS Passive) is analyzed using the SHARC simulation tool based on the characteristics of the EESS (Passive) sensors of the IMT- 2020 systems. Specifically, simulations of aggregate interference from Base Stations (BS) and User Equipment (UE) of the IMT system were reproduced for the EESS (Passive), considering clutter losses in radio propagation, losses due to entry into buildings and attenuation in the atmosphere. The studies were carried out following the Monte Carlo method, in which, during each iteration, a number of IMT-2020 stations are distributed in the study area and the aggregated interference level generated by all these stations in the other system is calculated. For the characterization of the systems, the characteristics of the sensors of the EESS (Passive) and of the IMT-2020 systems, Advanced Antenna Systems (AAS), Beamforming and the formation of grating lobes were studied. It is shown that the assessments that supported the WRC-19 decisions may not be enough to determine adequate protection criteria for the –EESS (Passive). Thus, it is proposed in this study to evaluate the change of input parameters in the coexistence studies between IMT systems and the EESS (Passive).

Keywords: 5G, coexistence, compatibility, IMT-2020, EESS Passive, Interference, mmWave, sharing, Weather Forecast

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de um sistema de comunicação.....	19
Figura 2 - Emissões em banda adjacente do IMT-2020 no EESS (Passivo).....	20
Figura 3 - IMT-2020.....	21
Figura 4 - Arquitetura de Rede Celular	22
Figura 5 - Geometria do Modelo da Antena.....	27
Figura 6 - Geometria de radiômetros de micro-ondas passivos de varredura cônica.....	34
Figura 7 - Padrão típico de varredura cruzada da Terra	35
Figura 8 - Padrão de varredura de detecção típico em 360 °	36
Figura 9 - Configuração típica de radiômetro ao longo da trilha	37
Figura 10 - Máscara de espectro IMT-2020 ERB (dBc)	46
Figura 11 - Espectro IMT-2020 terminal do usuário.....	47
Figura 12 - Emissões indesejadas.....	48
Figura 13 - Diagrama de radiação da antena EESS (Passiva) para Sensores F1, F3, F5, F6, F7 e F8	57
Figura 14 - Posição da estação de satélite EESS (Passiva) em relação à rede IMT para sensores nadir e inclinados	57
Figura 15 - Máscara de emissão indesejável da ERB IMT-2020 sobre a faixa de frequência de operação do EESS (Passivo).....	58
Figura 16 - Máscara de emissão indesejável do terminal de usuário IMT-2020 sobre a faixa de frequência de operação do EESS (Passivo).....	59
Figura 17 - Interferência dos sistemas IMT no EESS (Passivo) para cada sensor.....	60
Figura 18 - Fluxograma da simulação	63
Figura 19 - Normalização de antenas IMT	64
Figura 20 - Tela de simulação	65
Figura 21 - CDF do ganho da antena IMT para o Sistema EESS (Passivo).....	66
Figura 22 - CDF de perda de acoplamento.....	67
Figura 23 - Topologia de rede IMT Simulada.....	68
Figura 24 - Distribuição dos usuários.....	70
Figura 25 - Definição de distâncias para perdas de caminho	73
Figura 26 - Geometria para modelo de perda de percurso $d_1 - d_2$	74
Figura 27 - Probabilidade de LoS do link ERB para Terminal de Usuário.....	75
Figura 28 - Impacto da perda de acoplamento de LoS no desempenho de IMT.....	76

Figura 29 - Impacto da probabilidade de LoS na interferência do Terminal do Usuário IMT no sensor F3.....	76
Figura 30 - Diagramas de radiação.....	78
Figura 31 - Simulação de beamforming antes e depois do ajuste d / λ	91
Figura 32 - Simulação de beamforming antes e depois do ajuste do fator k.....	93
Figura 33 - Ganhos de antena IMT em relação ao sensor F3.....	94
Figura 34 - Interferência dos sistemas IMT ao sensor F3.....	95
Figura 35 - Interferência dos sistemas IMT no EESS (Passivo) para cada sensor.....	96
Figura 36 - Diagrama de radiação de antena da Estação Base IMT 2020; (a) Horizontal; (b) Vertical - Para um ângulo de elevação de grating lobe de 30°	99
Figura 37 - Interferência agregada de emissões indesejadas da ERB IMT no sensor F3 na faixa de frequência 23.8-24 GHz.....	100
Figura 38 - Aumento da densidade na rede.....	101
Figura 39 - Modelo de design de antena (8×8) com dielétrico laminado.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diagrama de elemento para modelo de matriz de antena.....	31
Tabela 2 – Diagrama de radiação de antena composta para formação de feixe da ERB e terminal do usuário	32
Tabela 3 - Características do sensor EESS (Passivo) na faixa de frequências 23.6-24 GHz ...	38
Tabela 4 - Características da Estação Base IMT-2020.....	44
Tabela 5 - Máscara do espectro ERB para cenários externos e PTx <34,5 dBm na faixa de frequência 24,25 33,4 GHz.....	45
Tabela 6 - Máscara do espectro ERB para cenários externos e PTx <34,5 dBm na faixa de frequência 24,25 33,4 GHz.....	45
Tabela 7 - Características do equipamento do usuário IMT-2020	46
Tabela 8 - Máscara do espectro terminal do usuário	47
Tabela 9 - Máscara do espectro terminal do usuário	47
Tabela 10 - Limite de emissões para Estações Rádio Base.....	48
Tabela 11 - Limite de emissões para terminal do usuário	49
Tabela 12 - Sensores do serviço EESS (Passivo).....	53
Tabela 13 - Limite de emissão indesejável (TRP) para Estações Rádio Base	59
Tabela 14 - Limite de emissão indesejável (TRP) para terminal do usuário.....	59
Tabela 15 - Margens para critérios de proteção passiva EESS (-166 dBW / 200 MHz em 0,01% do tempo)	61
Tabela 16 - Limites de emissões indesejadas para atender aos critérios de proteção EESS (Passiva) em dBW / 200MHz.....	61
Tabela 17 - Cenários de atendimento e modelos de canais	81
Tabela 18 - Margens para critérios de proteção passiva EESS (-166 dBW / 200 MHz em 0,01% do tempo)	96
Tabela 19 - Limites de emissões indesejadas para atender aos critérios de proteção EESS (Passiva) em dBW / 200MHz.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ACRÔNIMOS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G	Sistema de telefonia móvel de 5ª Geração
AF	<i>Array Factor</i>
AAS	<i>Advanced Antenna System</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	<i>Base Station</i>
CL	<i>Coupling Loss</i>
CMR	Conferência Mundial de Radiocomunicações
CMR-19	Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019
CPM	<i>Conference Preparatory Meetings</i>
dBc	Decibel em relação à portadora
dBW	Decibel Watt
dBm	Decibel miliwatt
CCDF	<i>Complementary Cumulative Distribution Function</i>
CDF	<i>Cumulative distribution function</i>
D _H	Espaçamento horizontal entre elementos
D _V	Espaçamento vertical entre elementos
DOA	<i>Direction of Arrival</i>
EESS	<i>Earth Exploration Satellite (Passive) Service</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ERB	Estação Rádio Base
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
Hz	Hertz
I _{Externo}	Interferência externa agregada em direção ao sistema interferido
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications-2020</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LMS	<i>Least Mean Squares</i>
LoS	<i>Line of sight</i>

MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MU	Multiusuário
MIMO	<i>Multiple-input and multiple-output</i>
mMTC	<i>massive Machine Type Communications</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
OOB	<i>Out of Band</i>
PDF	<i>Probability density function</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
Ra	Proporção de áreas de <i>hotspot</i> para áreas construídas
Rb	Proporção de áreas construídas para área total da região em estudo
RB	Recursos de Blocos
RF	Radiofrequência
RFI	<i>Radio Frequency Interference</i>
RLS	<i>Recursive Least Squares</i>
SDMA	<i>Space Division Multiple Access</i>
SHARC	<i>Simulador SHARing and Compatibility Studies</i>
SINR	<i>Signal to Interference & Noise Ratio</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TRP	<i>Total Radiated Power</i>
TRG	<i>Total Radiated Gain</i>
TG 5/1	<i>Task Group 5/1</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UT	<i>User Terminal</i>
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UMi	<i>Urban micro cell of street canyon</i>
URLLC	<i>Ultra-reliable low latency communication</i>
WP5D	<i>Working Party 5D</i>

SUMÁRIO

SUMÁRIO	14
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.3. OBJETIVOS	16
1.4. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
2. CONVIVÊNCIA ENTRE OS SISTEMAS ENVOLVIDOS	19
2.1. ELEMENTOS DOS SISTEMAS ENVOLVIDOS.....	19
2.2. SISTEMA MÓVEL 5G (IMT-2020).....	21
2.3. SISTEMAS DE ANTENAS AVANÇADOS	23
2.3.1. MATRIZ DE ANTENAS.....	24
2.3.2. <i>GRATING LOBES</i>	25
2.3.3. <i>BEAMFORMING</i>	26
2.4. SENSORES EESS (PASSIVOS).....	33
3. METODOLOGIA.....	42
3.1. MÉTODO DE MONTE CARLO	42
3.2. A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO SHARC	43
3.3. METODOLOGIA APLICADA NAS SIMULAÇÕES	62
4. ESTUDOS	87
5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	98
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	110

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

No Brasil, a função de administração do espectro de radiofrequências cabe à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), que precisa conciliar, em suas decisões, seu uso eficiente e evitar interferências. Entre as competências da Anatel (3) está representar o Brasil em organismos internacionais de telecomunicações, como a União Internacional de Telecomunicações (UIT), a Agência da Organização das Nações Unidas (ONU) destinada a padronizar e harmonizar as ondas de rádio e telecomunicações internacionais. A Anatel também realizou em 2021 a licitação de espectro de radiofrequências para redes de telecomunicações de quinta geração, que abarcará as faixas de radiofrequência de 700 MHz, 2,3 GHz e 3,5 GHz, que já estavam harmonizadas pela UIT para o IMT, e a faixa de radiofrequência de 26 GHz, que é o objeto deste estudo.

A UIT realiza periodicamente a Conferência Mundial de Radiocomunicações, na qual delegados dos países membros da UIT reúnem-se para rever ou alterar o Regulamento das Radiocomunicações (1) referentes a todos os serviços de telecomunicações em nível mundial. A Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 (CMR-19) identificou as faixas de frequência 24,25 a 27,5 GHz, 37 a 43,5 GHz, 45,5 a 47 GHz, 47,2 a 48,2 GHz e 66 a 71 GHz para a implantação de redes 5G e adotou medidas para garantir proteção aos serviços de exploração de satélites da Terra, incluindo serviços meteorológicos e outros serviços passivos em faixas adjacentes.

Dentre essas medidas, foi acordado introduzir dois estágios de proteção para frequências próximas a 24 GHz - uma faixa próxima àquela que os satélites meteorológicos usam para detectar a quantidade de água na atmosfera. Segundo Alexandra Witze, em artigo da revista *Nature* (4), meteorologistas da Organização Meteorológica Mundial (OMM) apresentaram preocupações, pois as transmissões 5G envolvem muitas frequências, mas a principal em discussão é a frequência de 23,8 GHz. Vapor de água na atmosfera naturalmente produz um sinal fraco nesta frequência, que os satélites usam para medir a umidade e esses dados alimentam as previsões do tempo. Mas se uma estação 5G estiver transmitindo um sinal próximo à frequência de 23,8 GHz, um satélite meteorológico do tipo Serviço de Exploração da Terra por Satélite Passivo (EESS Passivo) pode captá-lo e interpretá-lo erroneamente como vapor d'água.

O EESS (Passivo) é um dos satélites em órbita terrestre baixa (LEO) operando em órbita de cerca de 800 km. Seu principal objetivo é monitorar a condição da Terra e da atmosfera, utilizando sensores passivos. Eles são passivos porque não emitem energia de radiofrequência e medem a variação de ruído das radiações dos elementos da natureza, como terreno, pressão atmosférica e temperatura. É muito sensível a interferências porque recebe ondas de rádio fracas de origem natural.

Atualmente, o IMT-2020 é suportado em duas faixas de frequências, FR1 de 410 MHz a 7,125 GHz e FR2 de 24,25 a 52,6 GHz (5). Os sistemas IMT-2020 na faixa de frequências de 700 MHz, 2,3 GHz e 3,5 GHz (FR1) podem ser vistos como uma evolução natural dos serviços móveis para alcançar maior largura de banda e viabilizar novas aplicações definidos para a próxima geração de redes móveis. A implementação do IMT-2020 na faixa de 24,25 a 27,5 GHz (FR2) no Brasil intensifica a relevância desse assunto para o Brasil em relação a países que estão utilizando frequências na faixa de 28 GHz, pois está adjacente a faixa de 23,6 a 24 GHz alocada para o serviço passivo EESS.

Os nossos estudos mostram que as avaliações que embasaram as decisões da CMR-19 podem não ter sido exaustivas o suficiente para determinar critérios de proteção adequados para o EESS (Passivo). Assim, propõe-se neste estudo alteração de alguns dos parâmetros de entrada para o cálculo do número de estações rádio base IMT-2020, o que pode influenciar a formação de *grating lobes*, e a um forte aumento do nível de interferência na banda de frequência do EESS (Passivo) de 23,6 a 24 GHz.

Tendo em vista o constante crescimento das redes móveis celulares, pretende-se, também, analisar a sensibilidade do comportamento da rede considerando o aumento do número de estações no agregado do nível de interferência. Ou seja, considerando uma rede IMT inicial como referência, verificar o que ocorreria ao se aumentar em duas, três ou dez vezes o número de estações.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Entre duas Conferências Mundiais de Radiocomunicações (CMRs), como as realizadas em 2015 e 2019, da União Internacional de Telecomunicações, ocorrem as *Conference*

Preparatory Meetings (CPMs). Para a CMR-19 havia sido criado o *Task Group 5/1* cujo objetivo era estudar as necessidades de espectro, características técnicas e operacionais, incluindo critérios de proteção e cenários de implantação para o componente terrestre do 5G, bem como modelos de propagação, características técnicas, incluindo critérios de proteção e realização dos estudos apropriados de compartilhamento e compatibilidade, levando em consideração a proteção dos serviços aos quais as faixas estão alocadas em caráter primário.

O relatório final do *Task Group 5/1* (6) apresentou estudos de compatibilidade entre o IMT-2020 na faixa de 24,25 a 27,5 GHz e o EESS (Passivo) na faixa de 23,6 a 24,0 GHz. Ao longo do período de estudo não foi levantada nenhuma dúvida sobre a necessidade de garantir a proteção do EESS (Passivo) do IMT-2020 em uma base global e com uma perspectiva de longo prazo levando em consideração os sensores existentes, planejados e futuros. Todos os estudos concluem sobre a necessidade de limitar a emissão indesejada do IMT-2020 na faixa de frequência de 23,6 a 24 GHz para garantir o funcionamento e a disponibilidade desta faixa de frequência para EESS (Passivo).

Sensores EESS (Passivos) são radiômetros que medem as fontes de emissões (semelhantes ao ruído) dentro de uma banda e, na maioria dos casos não são capazes de discriminar entre radiações naturais e artificiais. O relatório ITU-R RS.2165 (7) caracteriza esses níveis de Interferência de Radiofrequência (RFI) como “Níveis baixos de RFI que não podem ser discriminados das radiações naturais e, portanto, representam um problema muito sério, uma vez que dados degradados ou incorretos seriam aceitos como válidos”. Portanto, sendo impossível contar com detecção e mitigação de interferência, a rede EESS (Passiva) só pode contar com estudos de compatibilidade realizados com o mais alto nível de confiança para garantir a proteção de sensores EESS (Passivos).

A Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 (CMR-19) decidiu em sua Resolução 750 (8) que para a proteção a longo prazo do EESS (Passivo) nas bandas de frequência 23,6 a 24 GHz, os serviços de telefonia de 5ª Geração operando na faixa 24,25 a 27,5 GHz:

- Devem respeitar o limite de emissão de energia indesejada de -33 dBW em qualquer 200 MHz da banda EESS (Passiva) para Estações Rádio Base até 1º de setembro de 2027. Após 1 de setembro de 2027 o limite de -39 dB (W / 200 MHz) será aplicado às Estações Rádio Base.

- Devem respeitar o limite de emissão de energia indesejada de -29 dBW em qualquer 200 MHz da banda EESS (Passiva) para os terminais do usuário até 1º de setembro de 2027. Após 1 de setembro de 2027 o limite de -35 dB (W / 200 MHz) será aplicado aos terminais do usuário.

Assim, as empresas que operam redes 5G terão exigências relativamente flexíveis até 2027. Depois disso, os limites de emissão indesejada ficam mais rígidos. Existem duas razões para estes diferentes limites temporais: (i) restrições tecnológicas para cumprir o segundo limite com a tecnologia atual; (ii) as redes começam pequenas e aumentam com o tempo, de forma que, no futuro, redes maiores precisarão ter limites mais rígidos para proteger o EESS (Passivo).

Um dos elementos-chave no sistema mmWave IMT-2020 é o Sistemas de Antenas Avançado, do termo em inglês *Advanced Antenna Systems* (AAS). AAS é o termo geral utilizado pela UIT (2), usado para descrever sistemas de antenas que usam técnicas que visam melhorar o desempenho e a eficiência espectral de transceptores de comunicação de rádio, aproveitando a teoria e a prática de antenas de *phased array* ativas que permitem a formação de feixes.

Se os parâmetros adotados para as antenas e alguns dos parâmetros para o cálculo do número de Estações Rádio Base da *International Mobile Telecommunications 2020 (IMT-2020)* operando na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz não estiverem corretos os sensores podem não prever corretamente os níveis radiados na banda de frequência EESS (Passiva) de 23,6 a 24 GHz.

1.3. OBJETIVOS

Objetivos Gerais

Avaliar a convivência entre sistemas 5G operando na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz e o EESS (Passivo) operando na faixa de frequência de 23,6 a 24 GHz. Um sistema IMT-2020 transmitindo na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz, que é adjacente a faixa de frequência de 23,6 a 24 GHz utilizado pelos sistemas EESS passivos podem fazer com que o sinal do 5G seja interpretado erroneamente pelos sensores como sinais de elementos da natureza utilizados para previsões meteorológicas.

Objetivos Específicos

- Realizar os estudos de convivência entre sistemas 5G operando na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz e o EESS (Passivo) operando na faixa de frequência de 23,6 a 24 GHz considerando os parâmetros aprovados nos grupos de trabalho competentes da UIT-R;

- Realizar a análise de sensibilidade considerando mudanças nos parâmetros de entrada diferentes daqueles usados no resultado da WRC-19 com base nas discussões realizadas após a conferência. Ou seja, fazer estudos adicionais que não foram feitas durante a preparação da conferência. para verificar possíveis efeitos não levados em consideração na convivência entre os sistemas, com por exemplo alteração na densidade de estações e alteração no espaçamento dos elementos das antenas;

- Analisar o impacto do surgimento de possíveis *grating lobes* com alteração de alguns parâmetros nos sistemas 5G operando na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz, e demonstrar, caso haja surgimento de *grating lobes* nas novas simulações, se haveria limitações nos *beam steering* das antenas.

Justificativas

O futuro das Telecomunicações Móveis Internacionais 2020 (IMT-2020), conhecida como telefonia móvel de 5ª Geração, depende de sua convivência harmônica com os demais serviços de telecomunicações que operam em faixas de frequências adjacentes. Em particular, a banda envolvida é a nova faixa de frequência 5G de 24,25 a 27,5 GHz. A controvérsia específica é quais medidas são necessárias para garantir que a Estação Rádio Base e os transmissores do terminal do usuário nesta banda não causem interferência nos satélites meteorológicos passivos, conhecidos como EESS (Passivo) em 23,6 a 24,0 GHz. A natureza dos sistemas EESS (Passivo) estão descritos na Recomendação ITU-R.RS.1861 (9).

De acordo com o artigo 5.340 do Regulamento das Radiocomunicações (1), "todas as emissões são proibidas" entre 23,6 e 24 GHz, que é uma alocação primária internacional para EESS (Passivo) e essa é uma obrigação de todos os países-membros da União Internacional de Telecomunicações. Tendo em vista ser impossível emissão zero de interferência em faixas tão

próximas, haverá um possível conflito entre o EESS (Passivo) e o 5G e a necessidade de estudos para mitigação dessa interferência.

A análise de interferência entre o IMT e o EESS (Passivo) já foram realizados em outros estudos (10) e (11), alertando que sensores passivos EESS não atendem aos critérios de proteção na maioria dos cenários, e técnicas adicionais de separação de frequência ou mitigação de interferência são necessárias para proteger esses sensores. No entanto, até o momento não foram verificados estudos relacionados a alteração na densidade de estações e alteração no espaçamento dos elementos das antenas. A contribuição deste trabalho é realizar essa análise de sensibilidade pioneira dos impactos desses cenários na convivência entre os sistemas.

1.4. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está organizada em seis Capítulos. O Capítulo 1 introduz o tema central, contextualiza as preocupações da comunidade meteorológica mundial e aborda as premissas assumidas pela UIT para garantir a proteção do EESS (Passivo) para emissões indesejadas do 5G. Também apresenta os objetivos do trabalho e as contribuições resultantes.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica sobre elementos de sistemas de comunicação, em especial dos sistemas 5G e dos sistemas EESS (Passivo), destacando os aspectos relacionados a rede de acesso rádio.

A ferramenta de simulação utilizada é descrita no Capítulo 3. Neste Capítulo estão explicadas a metodologia de simulação e a modelagem das estações dos sistemas analisados, que são as Estações Rádio Base e terminais do usuário do IMT-2020 e as estações do EESS (Passivo).

O Capítulo 4 contém a fundamentação teórica e revisão bibliográfica com destaque para revisão comparativa de estudos de convivência envolvendo proteção dos serviços EESS (Passivo), em relação a este trabalho.

O Capítulo 5 discorre sobre os resultados das simulações, ressaltando os parâmetros de entrada avaliados e os resultados. Por fim, o Capítulo 6 relata as conclusões e indica temas para trabalhos futuros.

2. CONVIVÊNCIA ENTRE OS SISTEMAS ENVOLVIDOS

2.1. ELEMENTOS DOS SISTEMAS ENVOLVIDOS

Para compreender o ambiente de convivência entre os sistemas IMT-2020 e EESS (Passivo) é necessário visualizar os elementos que o compõem como processos de comunicação de maneira individualizada e endereçar conceitos como matrizes de antenas, *grating lobes*, *beamforming* e os tipos de sensores utilizados pelos sistemas EESS (Passivos). Este Capítulo apresenta uma descrição geral dos trabalhos e dos elementos relevantes para as discussões propostas. Primeiramente são apresentados os sistemas envolvidos na convivência e em seguida são apresentados os sistemas de antenas inteligentes e o *beamforming*, juntamente com todas as características que serão estudadas nos estudos de convivência. Adicionalmente, é feita uma descrição geral dos sensores EESS (Passivo).

A comunicação, segundo Haykin (12), envolve implicitamente a informação transmitida de um ponto a outro por uma sucessão de processos. Independente do processo de comunicação que estiver sendo analisado, há três elementos básicos em cada sistema de comunicação, conforme Figura 1: transmissor, canal e receptor. O transmissor está localizado em um ponto do espaço e o receptor em algum outro ponto do espaço, separado do transmissor e o canal é o meio físico que os interliga. O propósito do transmissor é converter o sinal de mensagem produzido pela fonte de informação em uma forma adequada a transmissão por um canal. Entretanto, à medida que o sinal transmitido se propaga ao longo do canal, ele é distorcido devido às imperfeições do canal. Além do mais, ruídos e sinais interferentes, que se originam de outras fontes, podem ser acrescentadas pelo canal, resultando no sinal recebido, que é uma versão corrompida do sinal transmitido. O receptor tem a tarefa de operar sobre o sinal recebido a fim de reconstruir uma forma reconhecível do sinal original para o usuário.

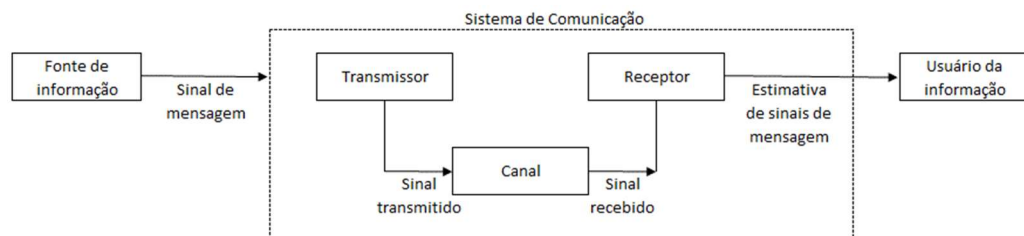


Figura 1 - Elementos de um sistema de comunicação

Fonte: Haykin (2001) (12)

Segundo Haykin, um ponto importante a considerar em um sistema de comunicação é a inevitável presença de ruído. O ruído refere-se a sinais indesejáveis que tendem a perturbar a transmissão e o processamento da mensagem em um sistema de comunicação. As fontes de ruído podem ser internas ou externas ao sistema. Os sensores passivos do EESS (Passivo) não transmitem ou recebem sinais de outros transceptores, eles detectam sinais de emissores naturais e por isso são muito sensíveis a ruídos gerados por sistemas de comunicação transmitindo em frequências adjacentes a sua.

A Figura 2 mostra o cenário em estudo, no qual o EESS (Passivo) opera na faixa 23,6 a 24 GHz, adjacente a redes 5G operando em 24,25 a 27,5 GHz.

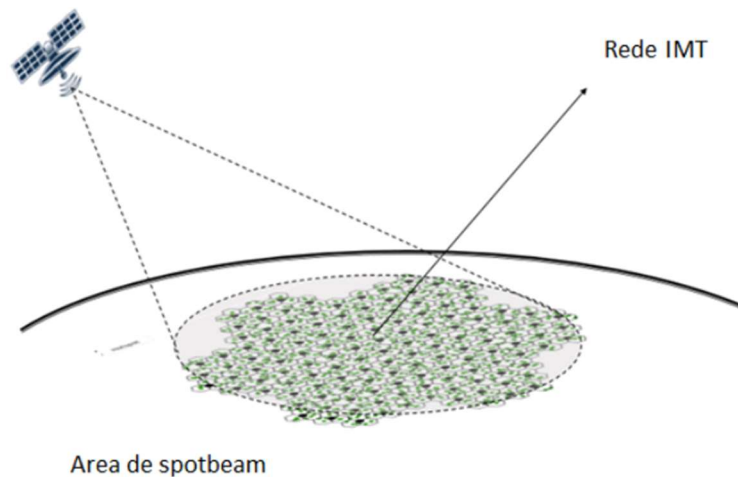


Figura 2 - Emissões em banda adjacente do IMT-2020 no EESS (Passivo)
 Fonte: ITU-R Attachment 2 to Annex 3 to Task Group 5/1 Chairman's Report (13)

As antenas implantadas pela estação espacial são muito diretivas (neste caso, $Gain_{boresight} = 52$ dBi), com eficiência de radiação do feixe principal de 95% conforme especificado na Recomendação ITU-R.RS.1861 (9) e no Adendo 2 ao Anexo 3 do Relatório do *Chairman* do *Task Group* 5/1 sobre Compartilhamento e compatibilidade de serviços passivos em bandas de frequência adjacentes e IMT operando na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz (13). Portanto, a área em estudo, na qual a interferência agregada das Estações Rádio Base IMT-2020 e do terminal do usuário está integrada, é a mesma área do feixe pontual do satélite. O sensor mais sensível utilizado pelo EESS (Passivo) nesta banda é o sensor F3 especificado na Recomendação ITU-R.RS.1861 (9), cujo feixe pontual é uma elipse de 18 km e 12 km, para eixo maior e menor, respectivamente (área de 169 km²).

2.2. SISTEMA MÓVEL 5G (IMT-2020)

Os sistemas móveis de 5ª Geração (5G) ou interface de rádio IMT-2020 são o padrão de tecnologia de redes móveis de quinta geração e é baseado em três pilares principais, conforme Figura 3, que são a banda larga otimizada, comunicações massivas máquina-máquina e comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (14). Dentro desse tripé temos uma série de aplicações que podem se encaixar em um desses tripés ou ser uma combinação deles. Além de suportar situações de uso de banda larga móvel aprimorada (eMBB), oferecerá suporte a aplicações emergentes em uma variedade de aplicativos, denominadas comunicações do tipo massivas de máquina (mMTC) e comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência (URLLC). A banda larga móvel e a banda larga móvel aprimorada são o resultado da aplicação de tecnologias mais espectralmente eficientes em faixas de espectro mais amplas, permitindo serviços de taxas com dados mais altas. A comunicação massiva do tipo máquina se refere à conectividade para um grande número de dispositivos de baixo custo e baixo consumo de energia no contexto da Internet das Coisas (IoT). As comunicações ultra confiáveis e de baixa latência são projetadas para permitir o controle em tempo real e a automação de processos dinâmicos em vários campos, como automação de processos industriais e manufatura, distribuição de energia, sistemas de transporte inteligentes - e requer comunicação com altíssima confiabilidade e disponibilidade, como bem como latência ponta a ponta muito baixa.

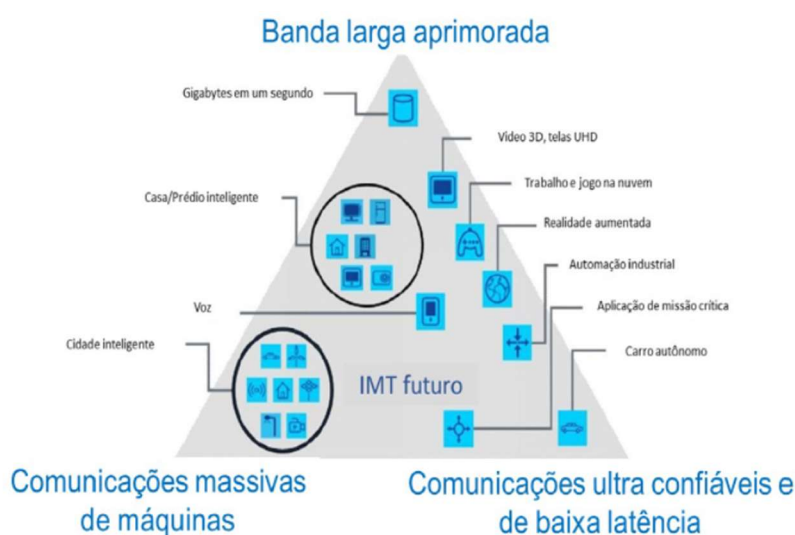


Figura 3 - IMT-2020

Fonte: Recomendação ITU-R M.2083 (14)

Nesta seção, apresentamos os sistemas de transmissão e de recepção em uma visão geral da arquitetura da rede celular, conforme ilustrado na Figura 4.

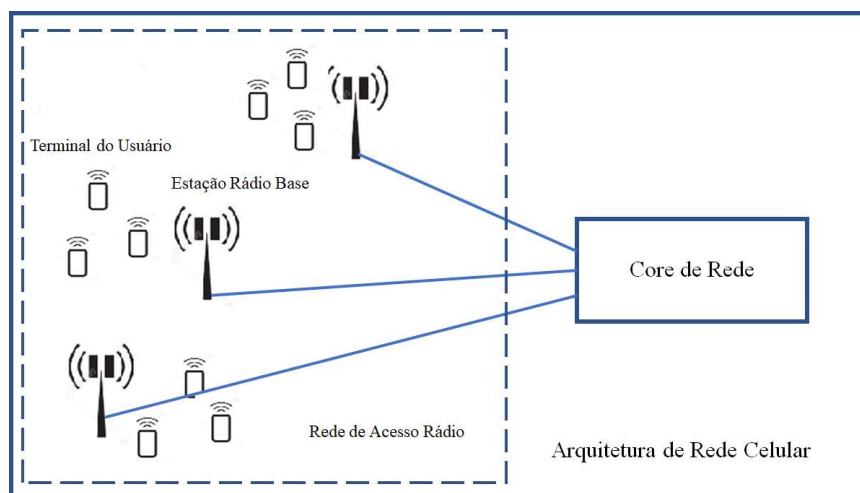


Figura 4 - Arquitetura de Rede Celular

As redes celulares podem ser divididas em três componentes diferentes: dispositivo celular, também conhecido como Terminal do Usuário, Rede de acesso de rádio (RAN) e a rede principal, ou núcleo de rede.

Terminal do usuário: Para *uplink*, alguns tipos de dispositivos, como por exemplo, dispositivos de baixa energia para aplicações mMTC, podem operar sem qualquer controle de potência, enquanto para outros tipos, como por exemplo, dispositivos de banda larga móvel aprimorada, o controle de potência será usado. O controle de potência compensa total ou parcialmente a diferença na perda de acoplamento entre os diferentes dispositivos conectados a uma Estação Rádio Base (ERB) e tem um nível alvo de recepção inicial por Bloco de Recursos (RB).

RAN: uma área geográfica, no contexto de uma rede celular, onde cada célula é atendida por uma única Estação Rádio Base, fornecendo conectividade de seus dispositivos celulares próximos à Internet por meio da rede central da operadora. Em essência, uma Rede de Acesso Via Rádio, ou RAN é a rede entre um terminal do usuário e uma Estação Rádio Base. Nenhum esquema de controle de potência de *downlink* é aplicado na Estação Rádio Base e a potência de transmissão por bloco de recursos (RB) é constante. A potência total do *downlink* varia de acordo com o número de RBs usados.

Core de Rede: É o núcleo da rede e é composto de quatro elementos: Gateway de Serviços, Gateway de rede de pacotes de dados, Entidade de Gestão de Mobilidade (MME) e Servidor de assinante doméstico (HSS). O Core de Rede conecta a rede IMT com as redes externas.

O IMT-2020 irá, além de operar em faixas de frequência mais baixas, também operar em faixas de frequência mais altas. O tamanho da antena é proporcional ao espaçamento dos elementos que por seu lado é proporcional a frequência utilizada, de forma que as Estações Rádio Base e os terminais terão uma área de cobertura menor utilizando antenas com um número maior de elementos em frequências mais altas como a faixa de 24,25 a 27,5 GHz. Um número maior de elementos de antena suporta formatos de feixe mais estreitos e pode reduzir a interferência potencial em outro receptor que não o pretendido. Além disso, maior ganho de feixe pode mitigar uma maior perda de percurso (do inglês *path loss*) em frequência mais alta, como 24,25 a 27,5 GHz e suporta vários fluxos de sinal para vários usuários, também conhecido como multiusuário (MU) – Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas (MIMO).

2.3. SISTEMAS DE ANTENAS AVANÇADOS

A evolução da capacidade de uma rede celular tem sido um desafio à medida que cresce o número de usuários do serviço. Para alcançar a capacidade exigida pelo crescente número de usuários e serviços, sistemas de telefonia móvel tiveram de evoluir ao longo dos anos. Inicialmente as redes celulares eram formadas com Estações Rádio Base com antenas omnidirecionais. Com o tempo foram adotadas técnicas para aumentar a capacidade dessas Estações Rádio Base, como a divisão de células e a setorização de células. Apesar da evolução, a setorização de células não fornece a necessária solução ao problema de capacidade. Portanto, os projetistas de sistemas buscaram uma técnica alternativa que permitisse a setorização dinâmica de uma célula. Então, passaram a examinar antenas inteligentes.

Um dos elementos-chave do sistema IMT-2020 em ondas milimétricas é o Sistemas de Antenas Avançado, ou *Advanced Antenna Systems* (AAS). AAS é o termo geral usado para descrever sistemas de antenas que usam técnicas que visam melhorar o desempenho e a eficiência espectral de transceptores de comunicação de rádio, aproveitando a teoria e a prática de antenas de *phased array* ativas que permitem a formação de feixes. Essas técnicas incluem

formação de feixe adaptável, múltiplas entradas e saídas múltiplas (MIMO) e acesso múltiplo por divisão de espaço (SDMA), entre outras, conforme Balanis (15). Essas técnicas de múltiplas antenas são geralmente aplicáveis a qualquer banda de frequência ou aplicação de rádio e podem ser implementadas usando antenas ativas ou passivas. Em bandas de frequência mais altas, como aquelas em torno das bandas de ondas milimétricas, os sistemas de antenas avançadas ativas são a escolha de tecnologia predominante.

Sistemas de antenas inteligentes ou avançados, segundo Balanis (15) e Pattan (16), são matrizes de elementos de antenas com algoritmos de processamento de sinal para rastrear a assinatura dos sinais como a direção de chegada do sinal, do inglês *Direction of Arrival* (DOA) para direcionar o feixe de radiação da antena para o usuário. O DOA calcula a direção de chegada de todos os sinais calculando os atrasos de tempo entre os elementos da antena e, posteriormente, o algoritmo calcula os critérios de ponderação (amplitudes e fases dos sinais) apropriados que resultam em um padrão de radiação otimizado. Como as antenas inteligentes podem focar seu diagrama de radiação na direção dos usuários desejados e, ao mesmo tempo, evitar interferência indesejada, essas antenas podem prover uma maior área de cobertura por cada Estação Rádio Base.

2.3.1. MATRIZ DE ANTENAS

Múltiplas antenas podem ser dispostas no espaço, em várias configurações geométricas, para produzir padrões altamente diretivos (17). Essas configurações de antena são chamadas de matrizes. Em uma matriz de antenas, os campos dos elementos individuais são adicionados de forma construtiva em algumas direções e destrutivamente (cancelando o campo) em outras. Para fins de análise, as matrizes são assumidas como consistindo de elementos idênticos, embora seja possível criar uma matriz com elementos de forma que cada um tenha um padrão de radiação diferente.

A principal vantagem das matrizes de antenas sobre um único elemento de antena é sua capacidade de varredura eletrônica; ou seja, o lóbulo principal pode ser direcionado para qualquer direção, alterando a fase da corrente de excitação em cada elemento da matriz (matrizes de antenas com controle de fase ou *phased array antennas*). Além disso, controlando também a intensidade da corrente de excitação, uma grande variedade de padrões de radiação

e características de nível de lóbulo lateral podem ser produzidos. Antenas adaptativas (também chamadas de "antenas inteligentes" em aplicações de comunicações móveis) vão um passo além nas matrizes de antenas com controle de fase e podem direcionar seu lóbulo principal (com ganho aumentado) em uma direção desejada (por exemplo, um usuário móvel em um sistema de comunicação celular) e nulos nas direções de interferência ou bloqueadores (17).

O desempenho geral da matriz (diagrama de radiação, diretividade, etc.) depende dos seguintes fatores:

- 1 Geometria (por exemplo, arranjo linear, circular ou plano dos elementos radiantes, o número de elementos);
- 2 Distância de separação entre elementos de antena adjacentes, em função do comprimento de onda;
- 3 Excitação de corrente de fase e amplitude de cada elemento individual; e
- 4 Diagrama de radiação de cada elemento individual.

Em muitos casos práticos, incluindo matrizes de antenas usadas por sistemas IMT, todos os elementos de antena são idênticos. Isso simplifica consideravelmente a análise e caracterização da matriz.

O diagrama de radiação da matriz consiste em dois fatores: o diagrama de radiação de campo distante de um único elemento, ou o diagrama do elemento, e o diagrama de radiação da matriz com os elementos reais substituídos por antenas isotrópicas ou o fator de matriz, do inglês *Array Factor (AF)*. Segundo Stutzman, (18) o diagrama total da matriz no campo distante é então o produto do diagrama do elemento e do fator de matriz.

$$\text{PadrãoTotal} = \text{Padrão do Elemento} \times \text{Fator de Matriz} \quad (1)$$

2.3.2. GRATING LOBES

Além do feixe principal em que temos diversos elementos da antena contribuindo em fase e criando o lóbulo principal, pode ocorrer um caso em que também pode haver diversos

elementos contribuindo também em fase de tal forma a criar um lóbulo lateral de intensidade compatível e às vezes até maior que o do lóbulo principal, conhecido como *grating lobes*.

Quando o coeficiente de peso aplicado a cada elemento e seu espaçamento são adequadamente ajustados, o feixe principal da matriz pode ser direcionado na direção esperada. O máximo principal é referido como o lóbulo principal e os lóbulos restantes como lóbulos secundários. Porém, ao direcionar um feixe com azimute $\phi_0 = 0^\circ$ e elevação dada θ_0 , qualquer espaçamento de elemento d maior ou igual a $\frac{\lambda}{1 \pm \cos\theta_0}$ introduzirá múltiplos máximos de igual magnitude no fator de matriz (AF), denominados *grating lobes* conforme Balanis (15) e Stutzman (18). Um “*grating lobe*”, em tradução livre lóbulos de grade, é definido como “um lóbulo, diferente do lóbulo principal, produzido por uma matriz de antenas quando o espaçamento entre elementos é suficientemente grande para permitir a adição em fase de campos radiantes em mais de uma direção”. Reduzir os lóbulos de grade é equivalente a garantir que apenas um máximo seja alcançado, correspondendo ao lóbulo principal.

2.3.3. BEAMFORMING

A conformação de feixes, ou “*beamforming*”, é a capacidade da matriz de antenas de focar energia em uma direção específica no espaço e nulos nas direções indesejadas. Do ponto de vista estatístico, a formação de feixes pode ser considerada como a extensão espacial do método de filtragem tradicional de Wiener (ou adaptativo) de acordo com Monzingo e Miller (19). A formação do feixe pode ser feita no domínio analógico ou digitalmente.

A antena de conformação de feixe é baseada em uma matriz de antenas e consiste em um número de elementos radiadores idênticos localizados no plano yz com uma distância de separação fixa (por exemplo, $\lambda / 2$), com todos os elementos tendo diagramas de radiação idênticos e “apontando” (tendo diretividade máxima) ao longo do eixo x .

De acordo com a teoria de matrizes adaptativas (15), uma função de ponderação é usada para direcionar o feixe em diferentes direções. Os algoritmos de processamento de sinais adaptam o feixe do sinal radiado ajustando a magnitude e a fase de cada elemento de antena de modo que um padrão desejável seja formado. e o ganho total da antena é a soma (escala logarítmica) do ganho da matriz e do ganho do elemento com esse ajuste.

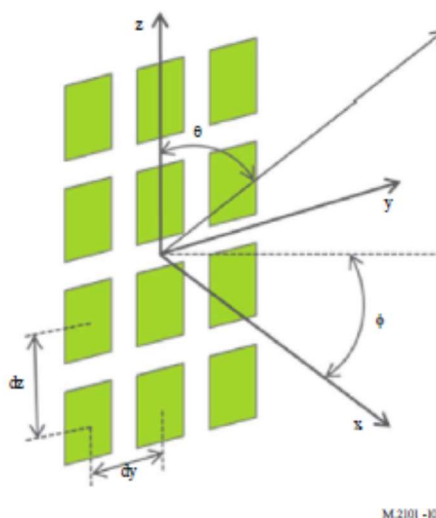


Figura 5 - Geometria do Modelo da Antena
 Fonte: Recomendação ITU-R M.2101 (2)

Conforme a Figura 5 os elementos de radiação são distribuídos uniformemente no plano $x-z$. O plano $x-y$ representa o plano horizontal. O ângulo de elevação da direção do sinal é denotado como θ (definido entre 0° e 180° , com 90° representando o ângulo perpendicular ao plano da antena. O ângulo de azimute é denotado como ϕ (definido entre -180° e 180°).

Embora cada elemento da antena em uma matriz tenha seu próprio diagrama de radiação, o efeito de radiofrequência de todos os elementos da matriz depende de:

- Tamanho da matriz e espaçamento do elemento; e
- Mudanças de fase do sinal dos elementos e variação de amplitude

Juntas, essas variáveis descrevem o diagrama de radiação do fator de matriz. Combinar o padrão de fator de matriz e o padrão de elemento produz o diagrama geral de radiação de campo distante da antena de painel.

Uma matriz uniforme com espaçamento de elemento de meio comprimento de onda fornece diretividade máxima, que é igual ao número de elementos da matriz. Em uma matriz sem perdas, o ganho da antena é igual à sua diretividade. Isso pode ser expresso como

$$\text{Ganho da antena} = \text{Ganho do elemento} + 10 \cdot \log_{10}(N) \quad (2)$$

Ou seja, dobrando o número de elementos dobra-se o ganho da antena.

O espaçamento do elemento de antena também desempenha um papel importante na determinação da forma e ganho do padrão. Por exemplo, aumentar o espaçamento para uma matriz de quatro elementos, de $0,5\lambda$ para 2λ , reduz a largura do feixe de meia potência vertical e aumenta o ganho do lóbulo principal.

Assim, o número de elementos e o espaçamento dos elementos desempenha um papel importante na determinação da forma e do ganho das antenas de *phased array*. Aumentando o espaçamento entre os elementos da antena *phased array* pode aumentar o ganho máximo do lóbulo principal (15) e (20), mas dependendo do *phi-scan* ou *theta-tilt*, pode gerar *grating lobe*, que é um lóbulo lateral com ganho similar ao do lóbulo principal, dispersando assim a energia radiada para longe do lóbulo principal.

Isso ocorre porque controlando as fases e amplitudes do sinal de radiofrequência que alimentam os elementos da antena, é possível moldar dinamicamente o fator de matriz e o diagrama geral irradiado. Essa é uma das premissas da conformação de feixes.

As ondas em fase somam-se construtivamente, enquanto as ondas fora de fase agem de forma destrutiva. Então, dependendo da defasagem entre os elementos da antena, podemos alterar a forma e a direção do padrão.

Assim, as técnicas de conformação de feixes dependem da alteração das fases e amplitudes do sinal de radiofrequências que são alimentadas pelos elementos internos de radiação da antena. Uma aplicação direta deste conceito é direcionamento dos feixes ou *beam steering*, que é um componente-chave para as antenas.

Conformação de Feixe Analógico

Os formadores de feixes analógicos empregam vários componentes, como filtros de guia de ondas e deslocadores de fase para formar um feixe predefinido. Esses componentes fazem parte do circuito de radiofrequência analógico. Na formação de feixe analógico, o mesmo sinal de banda base é recebido (ou transmitido) pelos vários elementos da matriz de antenas, cujas diferentes fases formam o feixe espacial. Essa arquitetura requer uma única cadeia de radiofrequência e fornece recepção (ou transmissão) de fluxo de dados único.

Conformação de Feixe Digital

Na formação de feixe digital, cada elemento da matriz de antenas tem uma cadeia de radiofrequência separada e recebe (ou transmite) um sinal de banda base diferente, permitindo a recepção (ou transmissão) de múltiplos fluxos de dados. A formação de feixe digital é feita convertendo o sinal de radiofrequência incidente em sinais de banda base digital em fase (I) e fase em quadratura (Q) que são então ponderados, somados e armazenados. Dependendo dos pesos, múltiplos feixes podem ser gerados, permitindo a multiplexação espacial, ou seja, recepção (ou transmissão) de sinais sobrepostos em frequência, mas com diretividade distinta. Esses feixes podem ser fixados na orientação ou formados de forma adaptativa, dependendo dos mecanismos empregados.

Conformação de Feixe Híbrido

A formação de feixe híbrida combina a formação de feixe analógico e digital para aumentar o ganho da antena em uma direção específica e permitir a multiplexação espacial com a formação de mais de um feixe. Na formação de feixe híbrido, cada fluxo de dados é um sinal digitalmente formado por feixe recebido (ou transmitido) por um circuito de radiofrequência analógico separado associado a vários elementos de matriz de antenas.

Tipos de Conformação de Feixes

Os procedimentos de formação de feixes podem ser baseados na comutação entre vários feixes fixos que cobrem um determinado setor angular, ou por algoritmos adaptativos que aproximam os pesos de formação de feixes ideais. A formação de feixes comutados é fácil de implementar, mas tem desempenho limitado pelo número e características dos feixes fixos disponíveis para comutação. A matriz de Butler (21) e a matriz de Blass (22) são exemplos de técnicas para fornecer os feixes fixos.

Os pesos complexos de formação de feixe que otimizam algumas propriedades do sinal recebido podem resultar em diagramas de radiação com o feixe principal orientado para uma direção diferente da direção do sinal desejado. A geração de nulos na direção de sinais de interferência, por exemplo, pode moldar o diagrama de radiação ideal. Algoritmos adaptativos, como *Least Mean Squares* (LMS) e *Recursive Least Squares* (RLS), entre outros, aproximam iterativamente os pesos ótimos de formação do feixe.

Os estudos do TG 5/1 (23) levaram em consideração a Recomendação ITU-R M.2101 (2), em que, em uma situação de banda de frequência adjacente com o IMT como o sistema de interferência, o diagrama da antena para a emissão indesejada pode ser admitido como tendo um diagrama de radiação semelhante a um único elemento de antena.

A União Internacional de Telecomunicações está trabalhando em uma recomendação para antenas inteligentes com a denominação de Sistema de Antenas Avançado, do inglês *Advanced Antenna Systems* (AAS). Conforme descrito na Recomendação ITU-R M2101 (2), um sistema IMT usando um AAS controlará ativamente todos os sinais individuais sendo alimentados para elementos de antena individuais no conjunto de antenas, a fim de moldar e direcionar o diagrama de emissão da antena para uma forma desejada, por exemplo, um feixe estreito para um usuário. Em outras palavras, ele cria uma emissão desejada correlacionada da antena. O sinal indesejado, causado pela modulação de emissões *Out of Band* (OOB), ou emissões fora de banda do transmissor, produtos de intermodulação e componentes de emissão espúrios, não experimentará a mesma situação correlacionada da antena e terá um diagrama de emissão diferente. Um AAS não correlacionado tem um padrão de emissão de antena semelhante a um único elemento de antena.

Assim, em uma situação de banda de frequência adjacente com IMT como o sistema de interferência, o diagrama de radiação da antena para a emissão indesejada foi admitido como tendo um diagrama de radiação de antena semelhante a um único elemento de antena nos estudos de convivência do *Task Group 5/1* da UIT (23). O modelo de matriz de antenas AAS é determinado pelo diagrama do elemento da matriz, fator de matriz e sinais aplicados ao sistema da matriz. Com base na 3GPP TR 37.842 (24) e na 3GPP TR 37.840 (25), a Recomendação ITU-R M2101 (2), orientou o uso do diagrama de radiação do elemento e o diagrama de radiação da antena conforme Tabela 1.

O diagrama composto do arranjo de antena irá variar em função do tamanho do arranjo, como reflexo da quantidade de linhas (N_V) e colunas (N_H). O formato do diagrama do elemento, assim como de qualquer antena, será função direta dos ângulos de meia potência vertical e horizontal, θ_{3dB} e ϕ_{3dB} respectivamente, bem como da relação frente-costa do elemento (A_m), do nível do lóbulo secundário vertical (SLA_v), e do ganho máximo do elemento $G_{E,max}$. Estes são definidos como parâmetros de entrada no modelo, sendo aplicados às expressões apresentadas na Tabela 1.

Nas equações do diagrama de radiação horizontal $A_{E,H}(\phi)$ e vertical $A_{E,V}(\theta)$, o ângulo de meia potência de um diagrama de antena refere-se ao ângulo estabelecido entre a direção de ganho máximo da antena e a direção na qual o ganho é metade do valor máximo. A relação frente-costa é a razão entre a diretividade máxima da antena e a diretividade na direção da retaguarda em relação à direção de diretividade máxima.

Tabela 1 - Diagrama de elemento para modelo de matriz de antena

Diagrama de Radiação Horizontal	$A_{E,H}(\phi) = -\min \left[12 \left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \text{ dB}$
Abertura do feixe do ângulo de meia potência horizontal (ϕ_{3dB})	Parâmetro de entrada
Relação Frente-Costa: A_m e SLA_v	Parâmetro de entrada
Diagrama de Radiação Vertical	$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta-90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right] \text{ dB}$
Abertura do feixe do ângulo de meia potência horizontal (θ_{3dB})	Parâmetro de entrada
Diagrama de elemento único	$A_E(\phi, \theta) = G_{E,max} - \min \{ -[A_{E,H}(\phi) + A_{E,v}(\theta)], A_m \}$
Ganho de elemento (dBi), $G_{E,max}$	Parâmetro de entrada

Fonte: Recomendação ITU-R M.2101 (2)

Para o estudo em questão, em relação aos parâmetros dos referidos elementos do arranjo de antena da Estação Rádio Base IMT, adotou-se valores típicos de 65 graus para ângulos de meia potência θ_{3dB} e ϕ_{3dB} , 30 dB para relação frente-costa do elemento A_m , 30 dB para atenuação de lóbulo secundário do elemento (SLA_v), e 5 dBi de ganho máximo do elemento, $G_{E,max}$ (26).

A Tabela 2 ilustra a derivação do diagrama da antena composta, $A_A(\theta, \phi)$. $A_A(\theta, \phi)$ é o diagrama da matriz de antenas por formação de feixe resultante da soma logarítmica do ganho da matriz, $10 \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{i,n,m} v_{n,m} \right|^2 \right)$, em que $A_E(\theta, \phi)$ é o ganho do elemento, e $w_{k,n,m}$ e $v_{n,m}$ são os fatores da matriz. O diagrama composto para a antena da Estação Rádio Base deve ser usado onde a rede serve um ou mais terminais do usuário com um ou mais feixes, com cada feixe indicado pelo parâmetro i .

Tabela 2 – Diagrama de radiação de antena composta para formação de feixe da ERB e terminal do usuário

Configuração	Múltiplas colunas ($N_V \times N_H$ elementos)
Diagrama de radiação de matriz composta em dB $A_A(\theta, \phi)$	<p>Para feixe i:</p> $A_{A,Beam_i}(\theta, \phi) = A_E(\theta, \phi) + 10\log_{10} \left(\left \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{i,n,m} v_{n,m} \right ^2 \right)$ <p>o vetor de superposição é dado por:</p> $v_{n,m} = \exp \left(j \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \cos(\theta) + (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \right) \right),$ <p style="text-align: center;">$n = 1, 2, \dots, N_V; m = 1, 2, \dots, N_H;$</p> <p>a ponderação é dada por:</p> $w_{i,n,m} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left(j \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \sin(\theta_{i,etilt}) - (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \cos(\theta_{i,etilt}) \cdot \sin(\phi_{i,escan}) \right) \right)$
Configuração de matriz de antena (linha \times coluna)	Parâmetro de entrada
Espaçamento horizontal do elemento radiante d/λ	Parâmetro de entrada
Espaçamento vertical do elemento radiante d/λ	Parâmetro de entrada
Ângulo de down-tilt (graus)	Parâmetro de entrada

Fonte: Recomendação ITU-R M.2101 (2)

De acordo com o documento 3GPP TR 37.840 (25) do *3rd Generation Partnership Project – 3GPP*, o espaçamento horizontal dos elementos da antena é tipicamente de 0.6 ou 0.5λ e o espaçamento vertical dos elementos da antena é tipicamente de 0.9λ . Para este estudo, os AAS utilizados são modelados como painéis planos com 64 elementos (8×8) para as Estações Rádio Base e 16 elementos (4×4) para os terminais de usuário.

2.4. SENSORES EESS (PASSIVOS)

A Recomendação ITU-R RS.1861 (9) define as Características técnicas e operacionais típicas dos sistemas (passivos) de exploração da Terra por satélite usando alocações entre 1,4 e 275 GHz. Os sensores passivos são utilizados no sensoriamento remoto da Terra e de sua atmosfera pela exploração terrestre e por satélites meteorológicos em certas bandas de frequência atribuídas ao serviço de exploração terrestre por satélite (EESS) (Passivo). Os resultados dessas medições com sensores passivos são amplamente utilizados em meteorologia, climatologia e outras disciplinas para fins científicos. No entanto, esses sensores são sensíveis a quaisquer emissões dentro de sua banda alocada. Portanto, quaisquer emissões de radiofrequência acima de um determinado nível podem constituir interferência nos sensores passivos que usam essas bandas. Isso se deve principalmente ao fato de que os sensores passivos podem não ser capazes de diferenciar o sinal desejado da interferência e que a interferência pode não ser identificável nas medições desses sensores passivos.

Os sistemas EESS (Passivos) operam em órbita de satélite não geoestacionária (não GSO). As órbitas são normalmente circulares com uma altitude entre 350 e 1400 km.

2.4.1. Tipos de Sensores

Todos os sistemas de detecção passiva EESS executam uma forma de radiometria. A radiometria detecta quanta energia um corpo radia de acordo com sua temperatura. A quantidade de energia radiada pode depender de vários fatores como por exemplo a substância que radia. Dentro do campo de visão de um sensor passivo, pode haver vários radiadores na atmosfera, como vapor de água, partículas de gelo suspensas e água líquida em nuvem, emitindo na largura de banda do sensor.

Um único sensor passivo não consegue identificar por si mesmo quanta energia é radiada por cada substância em seu campo de visão. Por esse motivo, resultados mais confiáveis são obtidos comparando medições de vários sensores operando em várias frequências. Como os dados de qualquer sensor podem ser comparados com os de vários outros sensores, qualquer interferência recebida por um sensor pode corromper várias outras medições.

Radiômetros cônicos de varredura

Vários sensores passivos que utilizam frequências na faixa de micro-ondas para obter dados da superfície da Terra fazem uma varredura cônica girando em torno do nadir porque é importante, para a interpretação das medições da superfície, manter um ângulo de incidência constante do solo, para que os *footprints* permaneçam constantes em tamanho. Esse tipo de varredura também é importante porque as características de polarização do sinal medido têm uma dependência angular. As antenas de varredura cônica reúnem informações em áreas amplas, conforme mostrado na Figura 6. Os radiômetros de varredura cônica são usados para monitorar processos relacionados a umidade, como chuvas, vapor de água nos oceanos, umidade em nuvens, velocidade do vento próximo ao solo, temperatura na superfície do mar, umidade do solo, áreas cobertas por neve e parâmetros relacionados ao gelo no mar.

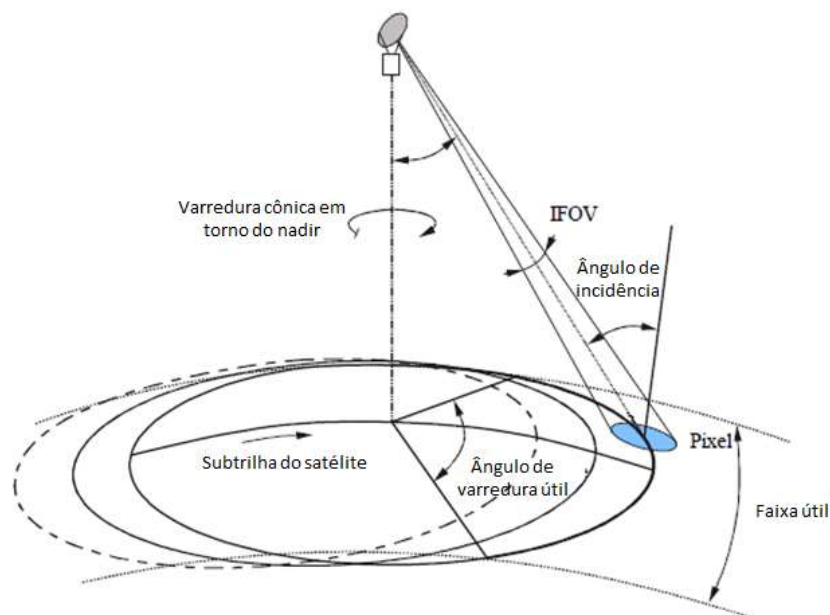


Figura 6 - Geometria de radiômetros de micro-ondas passivos de varredura cônica
Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

Radiômetros de varredura transversal

As medições radio métricas de varredura reúnem informações sobre áreas amplas, criando mapas virtuais do parâmetro sendo medido. Este produto de dados determina a variabilidade espacial horizontal de um parâmetro em vez de medir os parâmetros em pontos específicos. As medições de varredura também são normalmente realizadas em várias frequências e polarizações.

As aplicações típicas de radiômetros de varredura transversal, ou *cross-track*, incluem a medição de perfis de temperatura na alta atmosfera (especialmente a estratosfera) e fornecer uma capacidade de filtragem de nuvem para observações de temperatura troposférica. Eles também são usados para fornecer observações globais diárias de perfis de temperatura e umidade em alta resolução temporal e para medir o conteúdo de água líquida da nuvem e fornecer estimativas qualitativas da taxa de precipitação.

As varreduras são normalmente realizadas em um padrão de trajetória cruzada na superfície da Terra, conforme mostrado na Figura 7. A varredura de trajetória cruzada é realizada girando fisicamente um refletor 360°. Como o refletor é direcionado para longe da superfície da Terra, os canais do sensor ainda são usados como calibrações e são realizadas medindo o fundo cósmico (isto é, céu frio), além de uma fonte "quente" conhecida na estação espacial, como mostrado na Figura 8.

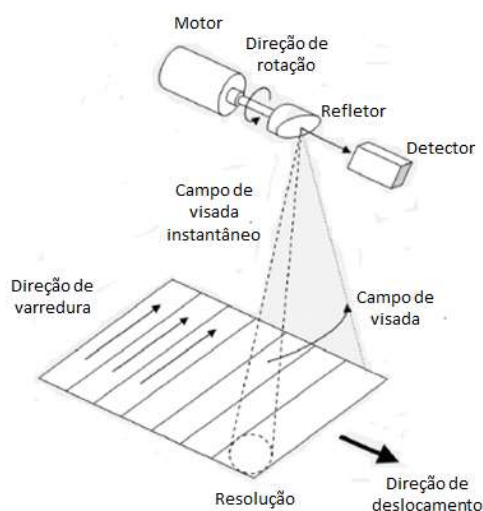


Figura 7 - Padrão típico de varredura cruzada da Terra

Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

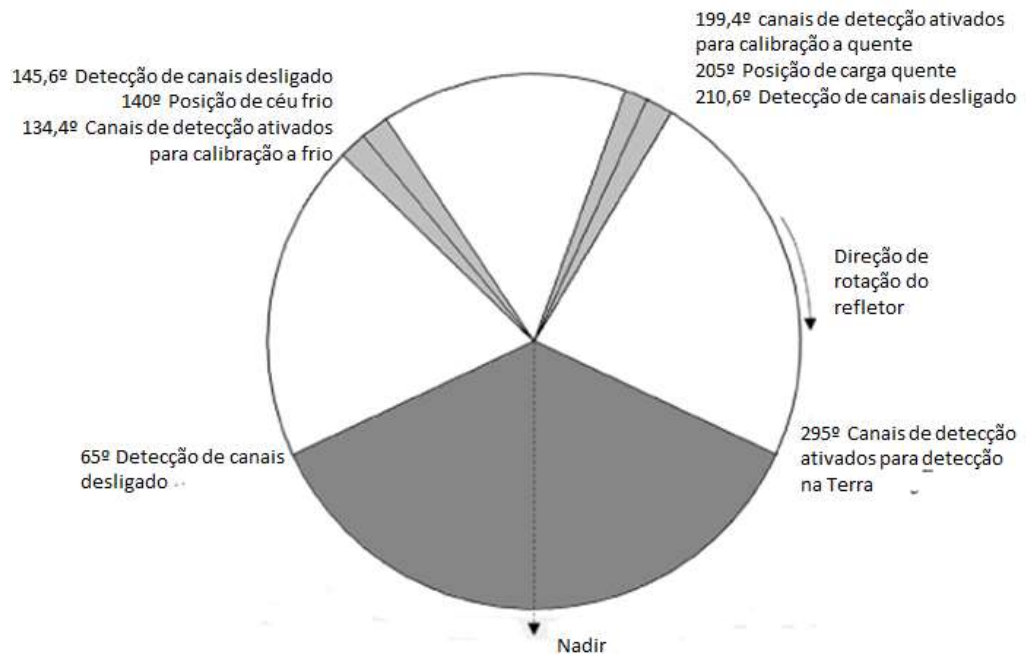


Figura 8 - Padrão de varredura de detecção típico em 360 °

Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

Radiômetros do tipo ao longo da trilha

Um sensor “*push-broom*” (ao longo da trilha) consiste em uma linha de sensores dispostos perpendicularmente à direção de órbita da estação espacial, conforme ilustrado na Figura 9. Diferentes áreas da superfície são detectadas conforme a estação espacial avança. O sensor ao longo da trilha é um instrumento puramente estático sem partes móveis. A principal característica do sensor ao longo da trilha é que todos os elementos de resolução em uma linha de varredura são adquiridos simultaneamente, e não sequencialmente como com os sensores escaneados mecanicamente, permitindo que esse tipo de sensor aumente significativamente a resolução radio métrica alcançável. Os sensores ao longo da trilha podem ser usados para uma variedade de aplicações, incluindo medições de perfis de temperatura da atmosfera e medições de umidade do solo e salinidade do oceano.

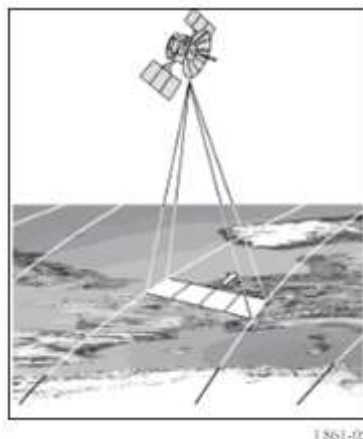


Figura 9 - Configuração típica de radiômetro ao longo da trilha

Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

Esse tipo de varredura é utilizado para sensoriamento remoto passivo para análise espectrográfica de infravermelho para identificar alimentos e rações contaminados e fazem essa varredura através de uma trilha simultaneamente para cada posição ao longo dessa trilha, conforme ilustrado na Figura 9.

2.4.2. Parâmetros típicos de sensores passivos operando na banda de 23,6-24 GHz

No caso de uma sonda, medições passivas em torno das frequências 23,8 GHz (conteúdo total de vapor de água), 31,5 GHz (canal de janela) e 90 GHz (água líquida) fornecem dados auxiliares que desempenham um papel predominante no processo de recuperação de medições de temperatura realizadas no Espectro de absorção de O₂. Essas medições auxiliares devem ter desempenhos radio métricos e geométricos e critérios de disponibilidade consistentes com aqueles das medições de temperatura. No caso de um radiômetro de varredura cônico, é possível medir a distribuição horizontal do vapor de água com outros canais. A Recomendação ITU-R RS.1861 (9) fornece as características de sensores EESS (Passivos) operando na faixa de frequência 23,6 a 24 GHz. Nesta banda de frequência, operam 8 sensores. Suas características relevantes para as análises deste estudo estão resumidas abaixo.

Tabela 3 - Características do sensor EESS (Passivo) na faixa de frequências 23.6-24 GHz

	Sensor F1	Sensor F2	Sensor F3	Sensor F4	Sensor F5	Sensor F6	Sensor F7	Sensor F8
Tipo de Sensor	Varredura Cônica			Varredura mecânica do nadir		Varredura Cônica	Var. ao longo da trilha	Varredura Cônica
Parâmetros de órbita								
Altitude	817 km	705 km	828 km	833 km 822 km*	824 km	835 km	850 km	699.6 km
Inclinação	20°	98,2°	98,7°	98,6° 98,7°*	98,7°	98,85°	98°	98,186°
Excentricidade	0	0.0015	0	0 0.001	0			0,002
Período de Repetição	7 dias	16 dias	17 dias	9 dias 29 dias*	9 dias			16 dias
Parâmetros de antena do sensor								
Número de feixes	1			30 campos terrestres para cada período de varredura de 8 s	2	1	90	1
Diâmetro do refletor	0,6 m	1,6 m	2,2 m	0,3 m 0,274 m*	0,203 m	0,6 m	0,9 m	48,5 dBi
Máximo ganho do feixe	40 dBi	46,7 dBi	52 dBi	34,4 dBi	30,4 dBi	43 dBi	45 dBi	2,0 m
Polarização	H, V			V, QV*	QV	H, V		H, V
-3 dB beamwidth	1,81°	0,9°	0,64°	3,3°	5,2°	1,5°	1,1°	0,75°
Campo de visão instantâneo	63 km × 38 km	32 km × 18 km	18 km × 12 km	Nadir FOV: 48,5 km FOV Externo: 149.1 × 79.4 km 147 × 79 km*	Nadir FOV: 74,8 km FOV Externo: 323.1 × 141.8 km	36 km × 86 km	16 km × 2 282 km	26 km × 15 km
Eficiência do feixe principal	96%	94,8%	95%					94%
Ângulo de apontamento Off-nadir	44,5°	47,5°	46,6°	±48,33° varredura transversal	±52,725° varredura transversal	55,4°		47,5°

	Sensor F1	Sensor F2	Sensor F3	Sensor F4	Sensor F5	Sensor F6	Sensor F7	Sensor F8
Parâmetros do sensor da antena (cont.)								
Dinâmica do feixe	31,9 rpm	40 rpm	31,6 rpm	Período de varredura 8 s	Período de varredura transversal 8/3 s; 96 campos terrestres por período de varredura	Período de varredura 2,88 s	90 elementos de resolução / linha	40 rpm
Ângulo de incidência na terra	52,3°	55°	53,63°	0° (nadir) 57,5°*		65°		55°
Dimensões do feixe -3 dB	38,7 km (varredura transvesal)	18 km (varredura transvesal)	14,1 km (varredura transvesal)	45 km 48 km*	76 km	22 km	16 km	15 km (varredura transvesal)
Largura da faixa	1 607 km	1 450 km	1 688 km	2 343 km 2 186 km*	2 503 km	2 000 km	2 282 km	1 450 km
Diagrama de radiação do sensor	Rec. ITU-R RS.1813	Rec. ITU-R RS.1861	Rec. ITU-R RS.1813	Rec. ITU-R RS.1861	Rec. ITU-R RS.1813		-12 dBi ganho do lóbulo traseiro	Rec. ITU-R RS.1813
Ganho de ant calibração fria	N/A	32,1 dBi	N/A	34,4 dBi	30,4 dBi	N/A	35 dBi	32,4 dBi
Ângulo de calibração frio (graus em relação a trilha do satélite)	N/A	115.5°	N/A	90° -90° ± 3.9°*	0	N/A	90°	115.5°
Ângulo de calibração frio (graus em relação a direção do nadir)	N/A	97,0°	N/A	83°	82.175°	N/A	83°	N/A
Parâmetros do receptor do sensor								
Tempo integração do sensor	1 ms	2,5 ms	1.2 ms	158 ms	18 ms	N/A		2,5 ms
Largura de banda do canal	400 MHz	400 MHz centrado em 23.8 GHz		270 MHz centrado em 23.8 GHz		400 MHz centrado em 23,8 GHz	N/A	400 MHz centrado em 23,8 GHz
Resolução espacial da medição								

Resolução horizontal	40 km	18 km	17,6 km	45 km 48 km*	75 km	38 km	16 km	15 km
Resolução vertical	N/A	30 km	N/A	45 km 48 km*	75 km	38 km	16 km	25 km
NOTA 1 – * Indica que um sensor específico voa em missões diferentes, com órbita e parâmetros de sensor diferentes.								

Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

Os estudos foram realizados no Sensor F3 que foi considerado pelo TG 5/1 (13) como o mais restritivo. Os resultados obtidos de outros sensores tiveram resultados similares (F2 e F8) ou menos restritivos.

3. METODOLOGIA

Neste Capítulo será apresentada a metodologia do trabalho proposto que consiste na simulação de Estações Rádio Base e terminais de usuários do sistema IMT e verificação da interferência gerada no sistema envolvendo sensores do Serviço de Exploração da Terra por Satélite. O método utilizado para a simulação foi o método de Monte Carlo, descrito a seguir, sendo que os valores de interferência para cada um dos cenários foram calculados usando a ferramenta SHARC.

3.1. MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é utilizado em simulações como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas em que não é viável, ou é mesmo impossível, obter uma solução analítica ou, pelo menos determinística (27) e (28). É utilizado para resolver problemas através da geração de uma sequência de dados aleatórios que seguem uma determinada distribuição estatística, que representa um processo estocástico real. Assim, é possível deduzir propriedades estatísticas recuperando informações a partir da sequência de dados aleatórios gerados.

No problema a ser aqui tratado, os dados aleatórios a serem gerados são localização dos *hotspots*, localização dos terminais do usuário, azimute das antenas das Estações Rádio Base, ângulo de elevação dos terminais do usuário, *clutter loss* dos *hotspots* e dos terminais do usuário, controle de potência dos terminais do usuário, direção da antena e direção de formação de feixe do IMT-2020 (o feixe principal de uma ERB aponta para um terminal do usuário desejado e vice-versa).

Para cada conjunto de parâmetros simulado a potência de interferência recebida pelo satélite é então analisada e uma função de distribuição cumulativa, do inglês *Cumulative Distribution Function* (CDF) será obtida. Os resultados da simulação são então comparados com os critérios de proteção de cada sistema de satélite para sugerir a possibilidade de coexistência entre o IMT-2020 e o sistema de satélite

3.2. A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO SHARC

Os estudos foram realizados seguindo o método de Monte Carlo. Para calcular a interferência agregada de várias Estações Rádio Base e terminais do usuário do Sistema IMT-2020 no EESS (Passivo), foi implementado no simulador SHARC (*SHARing and Compatibility Studies*) cenários com uma grande quantidade de estações de acordo com a Recomendação M.2101 da UIT-R (2). A ferramenta de simulação SHARC é um software de código aberto desenvolvida em Python e que permite estudos de compartilhamento e convivência entre o sistema IMT e outros serviços de radiocomunicação.

Para este estudo, as antenas dos sistemas IMT utilizados são modelados como painéis planos com 64 elementos (8x8) para as Estações Rádio Base e 16 elementos (4x4) para os terminais de usuário. A seguir, são apresentados os parâmetros do sistema IMT utilizados nas simulações.

3.2.1. Características técnicas e operacionais utilizadas para sistemas IMT

A implantação considerada é um *hotspot* urbano *outdoor*, com parâmetros indicados nas tabelas a seguir.

Na Tabela 4, R_a é a proporção de áreas de *hotspot* para áreas construídas e R_b é a proporção de áreas construídas para área total da região em estudo. Neste estudo, assume-se um valor para R_a de 7% em ambientes urbanos e 3% em ambientes suburbanos como uma proporção típica de implantações de *hotspots* em comparação com a área construída de uma cidade. Além disso, é assumido um valor para R_b de 5% como uma proporção típica de áreas construídas dentro de uma região, conforme definido no documento do TG5-1/36 do Grupo de Trabalho 5/1 da UIT-R (26).

Os limites de emissão indesejada definidos (26) usam valores de referência de linha de base de -13dBm/MHz para espúrios e L_{ohmic} é a perda ôhmica do arranjo de antenas (dB)

Tabela 4 - Características da Estação Base IMT-2020

No.	Parâmetro	IMT-2020 (Estação Rádio Base)
	Banda de frequência	24,25 a 27,50 GHz
1	Características do transmissor	
1.1	Método Duplexação	TDD
1.2	Largura de banda do canal	200 MHz
1.3	Largura de banda do sinal	> 90% da largura de banda do canal
1.4	Diagrama de radiação da antena	Recomendação ITU-R M.2101
1.5	Matriz da antenna	8×8
1.6	Ganho do elemento	5 dBi
1.7	Altura da antenna	6 m
1.8	Downtilt	10 graus
1.9	Potência conduzida por elemento de antena	10 dBm/200 MHz
1.10	Emissão espúria	-13 dBm/MHz
1.11	Perda ôhmica	3 dB
1.12	Perda de polarização	1,5 dB
1.13	Setores	Setor único
1.14	Densidade ERB (Ds urbano)	30 ERB /km ²
1.15	Densidade ERB (Ds suburbano)	10 ERB /km ²
1.16	Ra urbano	7%
1.17	Ra suburbano	3%
1.18	Rb urbano	5% (para área <1 000 km ²) e 100% (para área >1 000 km ²)
1.19	Rb suburbano	5% (para área <1 000 km ²) e 100% (para área >1 000 km ²)
1.20	Área de estudo	IFOV - campo de visada instantâneo

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

A máscara de emissão da Estação Rádio Base utilizada no cálculo da interferência está relacionada à potência da ERB, obtida com a potência radiada por antena, a potência composta de 64 elementos para o arranjo das antenas dos elementos. A potência total para a ERB considerada, conforme (29) é

$$P_{TX} = P_{el} + 10 \cdot \log(N_{el}) \quad (3)$$

Considerando a potência radiada por elemento de antena de 10 dBm por 200 MHz e um número de 64 elementos por antena neste estudo, temos:

$$P_{TX} = 10 + 18,1 = 28,1 \text{ dBm}/200 \text{ MHz}.$$

Com a potência de 28,1 dBm por 200 MHz, obtemos a máscara de espectro a ser usada para simulação da ERB na Tabela 5 abaixo conforme especificado no Doc. 5-1 / 36 (26) para sistemas IMT.

Tabela 5 - Máscara do espectro ERB para cenários externos e $P_{Tx} < 34,5$ dBm na faixa de frequência 24,25 33,4 GHz

Offset de frequência da "borda da transmissão" Δf	Limite de emissão	Largura de banda de medição
$0 \leq \Delta f < 20$ MHz	-5 dBm	1 MHz
$20 \text{ MHz} \leq \Delta f < 400$ MHz	$\max(P_{Tx} - 47,5 \text{ dB}, -20 \text{ dBm})$	1 MHz
$\Delta f > 400$ MHz	Limites de domínio de espúrios	1 MHz

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

Os valores do limite de emissão para a simulação são mostrados na Tabela 6 e Figura 10 a seguir.

Tabela 6 - Máscara do espectro ERB para cenários externos e $P_{Tx} < 34,5$ dBm na faixa de frequência 24,25 33,4 GHz

Offset de frequência da "borda da transmissão" Δf	Limite de emissão dBm para 1 MHz	Limite de emissão dBc
$0 \leq \Delta f < 20$ MHz	-5	-30,1
$20 \text{ MHz} \leq \Delta f < 400$ MHz	-19,4	-44,5
$\Delta f > 400$ MHz	-13	-38,1

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

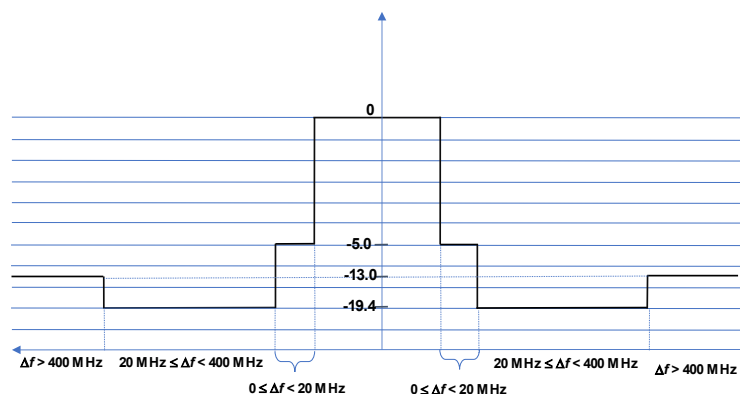


Figura 10 - Máscara de espectro IMT-2020 ERB (dBc)

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

Tabela 7 - Características do equipamento do usuário IMT-2020

No.	Parâmetro	IMT-2020 (–Terminal do Usuário)
	Banda de Frequência	24,25 GHz
1	Características do transmissor	
1.1	Método de duplexação	TDD
1.2	Largura de banda do canal	200 MHz
1.3	Largura de banda do sinal	> 90% da largura de banda do canal
1.4	Diagrama de radiação de antena	Recomendação ITU-R M.2101
1.5	Matriz da antenna	4×4
1.6	Ganho do elemento	5
1.7	Potência conduzida por elemento de antena	10 dBm/200 MHz
1.8	Emissão espúria	-13 dBm/MHz
1.9	Perda de polarização	3 dB
1.10	Perda de corpo	4 dB
1.11	Perda ôhmica de matriz	3 dB
1.11	Densidade Terminal do Usuário (Ds urbano)	100 Terminais do Usuário /km ²
1.12	Densidade Terminal do Usuário (Ds suburbano)	30 Terminais do Usuário /km ²
1.13	Área de estudo	Ifov - campo de visada instantâneo

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

A máscara de emissão do Terminal do Usuário, ou *User Equipment (UE)* a ser utilizada no cálculo de interferência está relacionada à potência do terminal do usuário e pode ser obtida na Tabela 8 conforme especificado no Doc. 5-1 / 36 (26). As tabelas a seguir apresentam a máscara do espectro do terminal do usuário utilizado nas simulações.

Tabela 8 - Máscara do espectro terminal do usuário

Offset de frequência da "borda da transmissão" Δf	Limite de emissão	Largura de banda de medição
$0 \leq \Delta f < 20$ MHz	-5 dBm	1 MHz
$20 \text{ MHz} \leq \Delta f < 400$ MHz	-13 dBm	1 MHz
$\Delta f > 400$ MHz	Limites de domínio de espúrios	1 MHz

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

Os valores do limite de emissão para a simulação são mostrados na Tabela 9 abaixo e na Figura 11.

Tabela 9 - Máscara do espectro terminal do usuário

Offset de frequência da "borda da transmissão" Δf	Limite de emissão dBm para 1 MHz	Limite de emissão dBc
$0 \leq \Delta f < 20$ MHz	-5	-24
$\Delta f > 20$ MHz	-13	-32

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

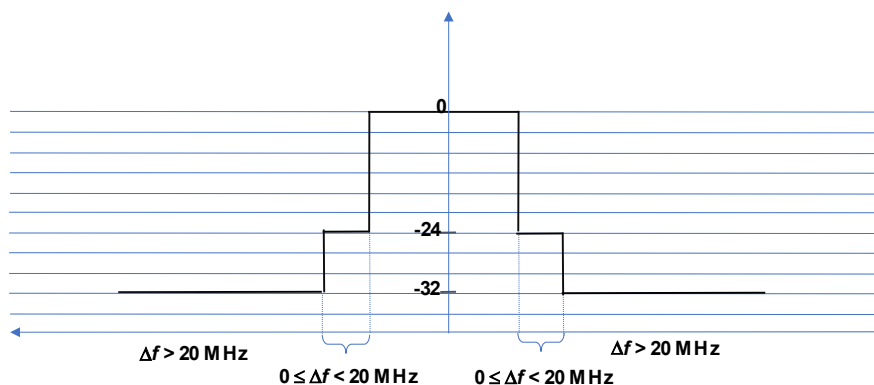


Figura 11 - Espectro IMT-2020 terminal do usuário

Fonte: Documento 5-1/36-E - Liaison Statement to Task Group 5/1 da UIT-R (26)

A probabilidade de carga, ou fator de carga, usada para a rede IMT é de 3 terminais do usuário ativos simultaneamente para cada *hotspot*, devido a uma grande área de simulação sobre o feixe pontual do satélite EESS (Passivo).

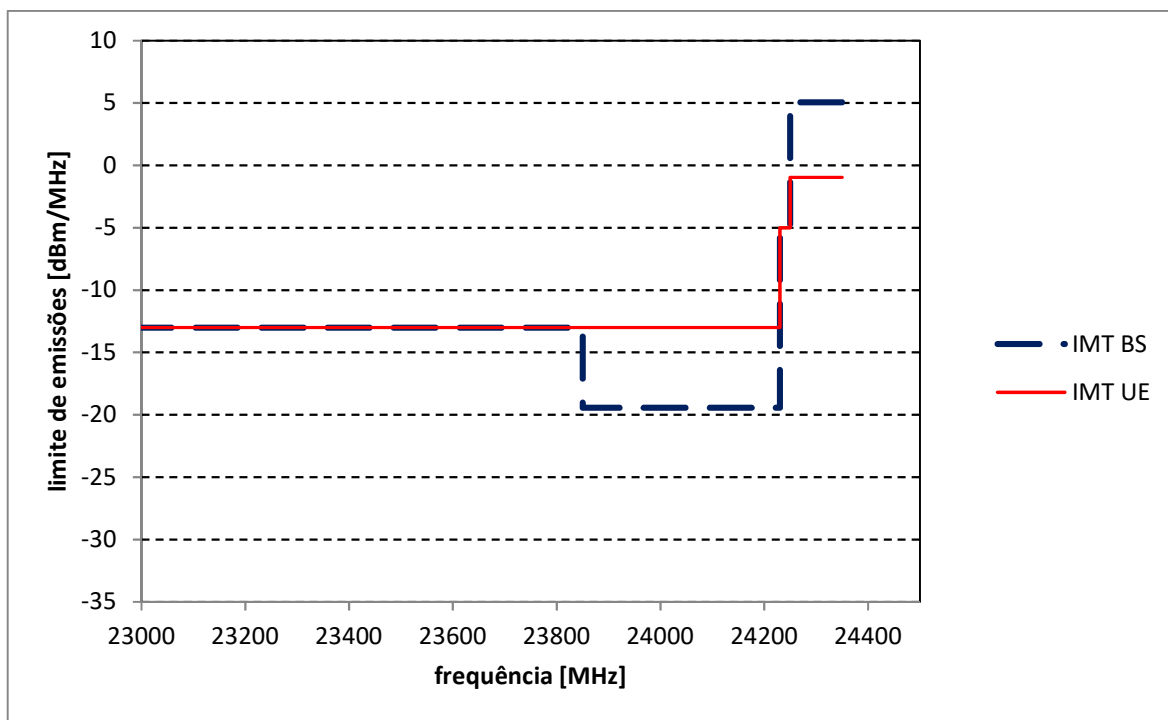


Figura 12 - Emissões indesejadas

Da Figura 12 acima obtém-se os valores abaixo de emissão indesejável para Estações Rádio Base:

Tabela 10 - Limite de emissões para Estações Rádio Base

frequência de offset [MHz]	Limite de emissões [dBm/MHz]	nível de emissão relativa [dBc]
$0 \leq \Delta f < 20$	-5,0	-30,1
$20 \leq \Delta f < 400$	-19,4	-44,5
$\Delta f > 400$ MHz	-13,0	-38,1

E para os terminais do usuário os valores de emissão indesejável são:

Tabela 11 - Limite de emissões para terminal do usuário

frequência de offset [MHz]	Limite de emissões [dBm/MHz]	nível de emissão relativa [dBc]
$0 \leq \Delta f < 20$	-5,0	-24,0
$20 \leq \Delta f < 400$	-13,0	-32,0
$\Delta f > 400$ MHz	-13,0	-32,0

A faixa de 23,85 GHz a 24,25 GHz é considerada como sendo domínio fora de banda, ou *Out of Band* (OOB), enquanto que abaixo de 23,85 GHz é considerado um domínio espúrio. Os limites de emissão indesejada (OOB + espúrios) utilizados foram definidos no Doc. 5-1 / 36 (26) e os valores de referência da linha de base são -20 dBW / 200 MHz (ou -13dBm / MHz) para espúrios e -44,5 dBc para OOB (largura de banda de medição de 1 MHz), conforme Tabela 10.

Potência Efetiva Isotropicamente Radiada (EIRP)

De acordo com Asplund et al (30), a Potência Efetiva Isotropicamente Radiada (EIRP) na antena é uma combinação da potência de saída por elemento e o ganho da matriz de antenas e pode ser calculada usando a fórmula abaixo.

$$EIRP = P_{el} + 10 \cdot \log(N_{el}) - L_{ohmic} + G_a \quad (\text{dBm}) \quad (4)$$

Onde

P_{el} é a potência conduzida antes da perda ôhmica por elemento de antena (dBm / 200 MHz);

N_{el} é o número de elementos da antena;

L_{ohmic} é a perda ôhmica do conjunto de antenas (dB);

G_a é o ganho de pico disponível na antena (dBi).

Para este estudo, a EIRP máxima para a Estação Rádio Base é calculada usando $P_{el} = 10$ dBm / 200 MHz, $N_{el} = 64$, $L_{ohmic} = 3$ dB e ganho de pico $G_{aERB} = 23,06$ dBi. Portanto, EIRP

$= 10 + 18,06 - 3 + 23,06 = 48,12$ dBm, ou seja, a potência máxima da Estação Rádio Base é 48,12 dBm / 200 MHz.

E a EIRP máxima para o terminal do usuário. é calculada usando $P_{el} = 10$ dBm / 200 MHz, $N_{el} = 16$, $L_{ohmic} = 3$ dB e o ganho de pico é calculado como $G_{aTerminal\ do\ Usuário} = 17,04$ dBi. Portanto, $EIRP = 10 + 12,04 - 3 + 17,04 = 36,08$ dBm.

Assim, a EIRP calculada é 48 dBm para Estação Rádio Base e 36 dBm para o terminal do usuário com controle de potência habilitado. A portadora da Estação Rádio Base é definida em 24,35 GHz, com uma largura de banda de 200 MHz.

Fator de Normalização

Em um sistema de antena sem perdas, a potência total radiada, ou *Total Radiated Power* (TRP) deve ser exatamente igual à potência total conduzida para o conjunto de antenas a partir do(s) transmissor(es). Como a potência radiada em cada direção é igual à potência total com a adição do ganho da antena nessa direção, então também é possível considerar que a integral do ganho da antena (sem perdas) sobre todo o azimute e elevação deve ser igual a 1 (0 dBi no log domínio), a fim de preservar a conservação de energia.

De acordo com Asplund et al (30), a TRP pode ser definida como uma integral da potência em todas as direções na esfera de radiação em torno da Estação Rádio Base:

$$TRP = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} R(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_{tx} * G(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (5)$$

Onde

$R(\theta, \phi)$ é a intensidade da radiação na direção (θ, ϕ) e P_{tx} é a potência conduzida (em Watts) que entra na antena e $G(\theta, \phi)$ é o ganho da antena ao longo da direção (θ, ϕ) .

De acordo com a recomendação ITU-R M.2101 (2): "Um sistema IMT usando um AAS (Sistema de Antena Avançado) controlará ativamente todos os sinais individuais sendo alimentados para elementos de antena individuais na matriz de antenas, a fim de configurar e direcionar o diagrama de emissão da antena para um forma desejada, por exemplo um feixe

estreito em direção a um usuário. Em outras palavras, ele cria uma emissão desejada correlacionada da antena. O sinal indesejado, causado pela modulação OOB do transmissor, produtos de intermodulação e componentes de emissão espúrios, não experimentará a mesma situação correlacionada da antena e terá um padrão de emissão diferente. Um AAS não correlacionado tem um padrão de emissão de antena semelhante a um único elemento de antena. Em uma situação de banda de frequência adjacente com IMT como o sistema de interferência, o padrão de antena para a emissão indesejada pode ser assumido como tendo um padrão de antena semelhante a um único elemento de antena.”

Na teoria de antenas, devido à conservação de energia, a quantidade total de ganho, na superfície da esfera ao redor da antena, o Ganho Total Radiado, ou *Total Radiated Gain* (TRG) deve ser igual a 1 (15). Durante o ciclo de estudos para Conferência Mundial de Radiocomunicações (CMR-19), nas avaliações de compatibilidade entre o IMT 2020 em 26 GHz e outros serviços, foi aplicado um fator de normalização ao modelo de antena do ITU-R M.2101 (2), de forma a compensar a falta de ganho em determinada direção de apontamento elétrico, garantindo assim um comportamento físico do modelo de antena utilizado na simulação.

A potência conduzida de uma AAS não pode ser medida devido à natureza integrada do AAS, em que não há porta separando o transmissor da antena. Assim, toda a potência conduzida para os estudos é traduzida em termos de TRP.

A equação da TRP pode ser dividida em três partes: a potência conduzida (em Watts) que é inserida na porta da antena, as perdas ôhmicas e o ganho radiado total, ou *Total Radiated Gain* (TRG):

$$TRP = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_{tx} * G(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi = P_{tx}(dB) - Lohmica(dB) + TRG(dB) \quad (6)$$

Onde TRG se refere ao ganho radiado total (expresso em dB).

Esta equação mostra que sem normalização do TRG, o modelo da ITU-R M.2101 utilizado nos estudos apresentaria sempre um TRG negativo quaisquer que sejam os pontos elétricos considerados e o TRP seria sempre subestimado nos estudos e como consequência, as interferências do IMT 2020 para outro serviço poderiam ser subestimadas.

A fim de avaliar os diagramas de radiação compostos (compartilhamento de co-canal) e de elemento único (compartilhamento de não co-canal), conforme proposto na Recomendação ITU-R M.2101 (2). O TRG foi calculado para as Estações Rádio Base e terminais do usuário, levando em consideração os parâmetros fornecidos no Documento 5-1/36 da UIT (26), como por exemplo, ganho de pico do elemento, número de elementos radiantes da antena. Assim, uma vez que o modelo de antena acima é usado para cálculo de interferência agregada com base na emissão indesejada do TRP IMT 2020, é necessário verificar se ele é consistente com uma antena realista, ou seja, se seu TRG está próximo de 0 dBi ou se:

$$TRG = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi \approx 1 \quad (7)$$

A aplicação desta fórmula (7) fornece os seguintes valores TRG para as Estações Rádio Base e terminais do usuário:

- Total de ganho radiado da ERB = - 4,83 dBi
- Ganho irradiado total do terminal do usuário = - 2,44 dBi.

Como os níveis de emissão indesejada das estações IMT 5G, são especificados no TRP e como o TRG deve ser igual a 0 dB, o uso do modelo descrito na Recomendação ITU-R M.2101 (2) na análise de compatibilidade na banda adjacente, portanto, subestimaria a interferência em -4,83 dB para Estações Rádio Base e -2,44 dB para terminais do usuário para antenas de elemento único. Para as antenas em *beamforming* a integral da equação (7) é calculada para cada *beam steering*, ou direcionamento do feixe.

Resumindo, um fator adicional foi introduzido nas simulações devido à necessidade de normalizar a potência total radiada no ângulo sólido.

	Sensor F1	Sensor F2	Sensor F3	Sensor F4	Sensor F5	Sensor F6	Sensor F7	Sensor F8
Número de feixes	1	1	1	30 campos terrestres por período de varredura de 8 s	2	1	90	1
Diâmetro do refletor	0,6 m	1,6 m	2,2 m	0,3 m	0,203 m	0,6 m	0,9 m	2,0 m
Ganho máximo do feixe	40 dBi	46,7 dBi	52 dBi	34,4 dBi	30,4 dBi	43 dBi	45 dBi	48,5 dBi
Polarização	H, V	H, V	H, V	V QV	QV	H, V		H, V
Largura de feixe de -3 dB	1,81°	0,9°	0,64°	3,3°	5,2°	1,5°	1,1°	0,75°
Campo de visada instantâneo – IFOV	63 km × 38 km	32 km × 18 km	18 km × 12 km	Nadir FOV: 48,5 km Fora do FOV: 149,1 × 79,4 km	Nadir FOV: 74,8 km Fora do FOV: 323,1 × 141,8 km	36 km × 86 km	16 km × 2 282 km	26 km × 15 km
Eficiência do feixe principal	96%	94,8%	95%	95%	95%	95%	95%	94%
Ângulo de apontamento fora do nadir	44,5°	47,5°	46,6°	±48,33° varredura transversal	±52,725° varredura transversal	55,4°		47,5°

	Sensor F1	Sensor F2	Sensor F3	Sensor F4	Sensor F5	Sensor F6	Sensor F7	Sensor F8
Dinâmica do feixe	31,9 rpm	40 rpm	31,6 rpm	Período de varredura de 8 s	Período de varredura cruzada de 8/3 s; 96 campos terrestres por período de varredura	Período de varredura de 2,88 s	90 elementos de resolução / linha	40 rpm
Ângulo de incidência na Terra	52,3°	55°	53,63°	0° (nadir) 57,5°*		65°		55°
Dimensões do feixe -3 dB	38,7 km (Varredura transversal)	18 km (Varredura transversal)	14,1 km (Varredura transversal)	45 km 48 km*	76 km	22 km	16 km	15 km (Varredura transversal)
Largura da faixa	1 607 km	1 450 km	1 688 km	2 343 km 2 186 km*	2 503 km	2 000 km	2 282 km	1 450 km
Padrão de antena do sensor	See Rec. ITU-R RS.1813	Fig. 9b of ITU-R RS.1861	See Rec. ITU-R RS.1813	Fig. 9c of ITU-R RS.1861	See Rec. ITU-R RS.1813	See Rec. ITU-R RS.1813	-12 dBi ganho do lóbulo traseiro	See Rec. ITU-R RS.1813
Ganho de antena de calibração a frio	N/A	32,1 dBi	N/A	34,4 dBi	30,4 dBi	N/A	35 dBi	32,4 dBi
Ângulo de calibração a frio (graus ref. Trilha de satélite)	N/A	115,5°	N/A	90° -90° ± 3,9°*	0	N/A	90°	115,5°

	Sensor F1	Sensor F2	Sensor F3	Sensor F4	Sensor F5	Sensor F6	Sensor F7	Sensor F8
Ângulo de calibração a frio (graus ref. Direção do nadir)	N/A	97,0°	N/A	83°	82,175°	N/A	83°	N/A
Parâmetros do receptor do sensor								
Tempo de integração do sensor	1 ms	2,5 ms	1.2 ms	158 ms	18 ms	N/A	N/A	2,5 ms
Largura de banda do canal	400 MHz	400 MHz centrado em 23,8 GHz	400 MHz centrado em 23,8 GHz	270 MHz centrado em 23,8 GHz z	270 MHz centrado em 23,8 GHz z	400 MHz centrado em 23,8 GHz	N/A	400 MHz centrado em 23,8 GHz z
Resolução espacial de medição								
Resolução horizontal	40 km	18 km	17,6 km	45 km 48 km*	75 km	38 km	16 km	15 km
Resolução vertical	N/A	30 km	N/A	45 km 48 km*	75 km	38 km	16 km	25 km

NOTA 1 – * Indica que um determinado sensor flui em diferentes missões, com diferentes órbitas e parâmetros de sensor.

Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

O diagrama de radiação da antena do sensor F3 considerado para o estudo está mostrado na Figura 13.

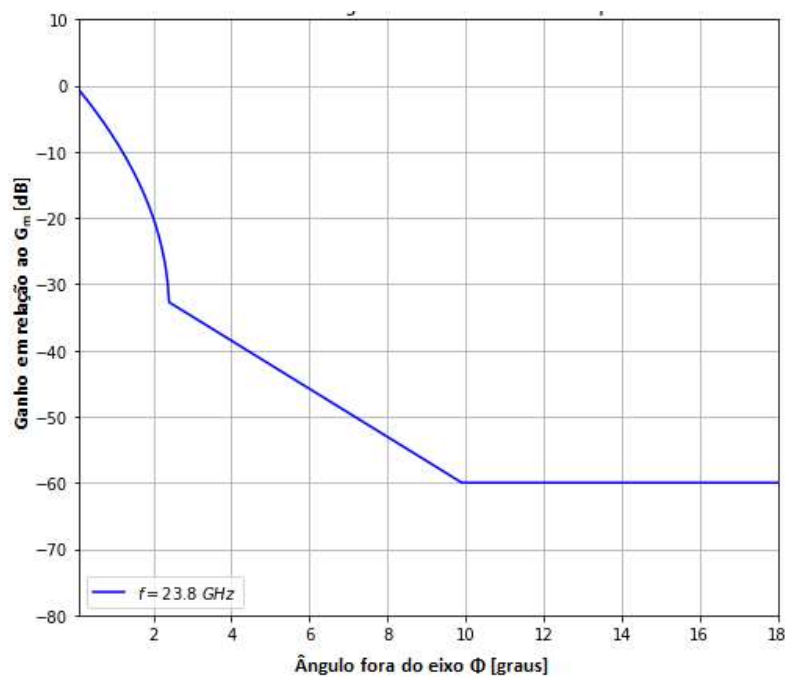


Figura 13 - Diagrama de radiação da antena EESS (Passiva) para Sensores F1, F3, F5, F6, F7 e F8

Fonte: Recomendação ITU-R RS.1861 (9)

Para o sensor F3 considerado no estudo, os três tipos de configuração são definidos como varredura cônica, varredura mecânica e ao longo da trilha e a inclinação do sensor em relação à rede IMT-2020 é considerada para calcular o ganho das antenas, conforme ilustrados na Figura 14.

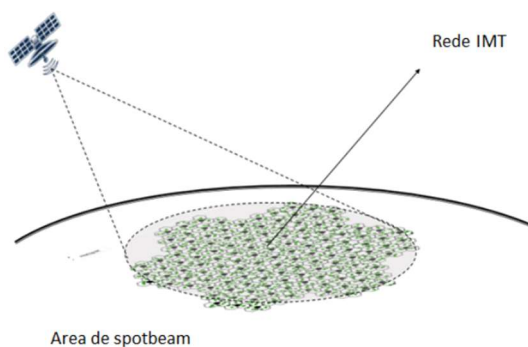


Figura 14 - Posição da estação de satélite EESS (Passiva) em relação à rede IMT para sensores nadir e inclinados

Fonte: Document 5-1/478-E - Attachment 2 to Annex 3 to Task Group 5/1 Chairman's Report da UIT-R

A potência de cada canal EESS (Passivo) é calculada a partir da máscara de emissão indesejável do IMT 2020 para Estações Rádio Base e terminais do usuário. Para todos os sensores as máscaras de espectro estão na região acima de 20 MHz (Δf), sendo que até 400 MHz as emissões são consideradas fora de banda e acima dessa faixa são consideradas espúrios conforme as Figuras 15 e 16.

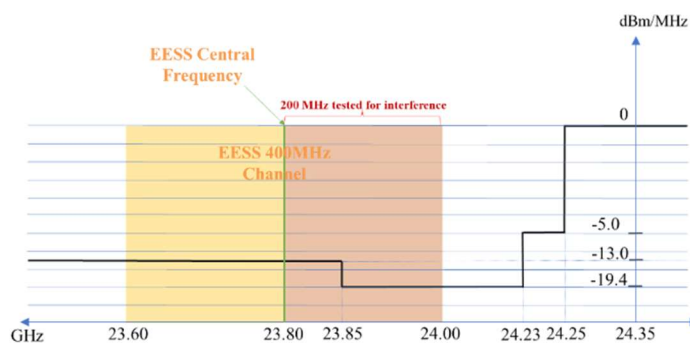


Figura 15 - Máscara de emissão indesejável da ERB IMT-2020 sobre a faixa de frequência de operação do EESS (Passivo)

Fonte: Document 5-1/478-E - Attachment 2 to Annex 3 to Task Group 5/1 Chairman's Report da UIT-R

(13)

Da Figura 15 obtemos os valores da Tabela 13 abaixo:

Tabela 13 - Limite de emissão indesejável (TRP) para Estações Rádio Base

offset da frequência [MHz]	Limite de emissão [dBm/MHz]	largura de banda calculada [MHz]
$0 \leq \Delta f < 20$	-5 (LE1)	0 (BW1)
$20 \leq \Delta f < 400$	-19,4 (LE2)	150 (BW2)
$\Delta f > 400$ MHz	-13 (LE3)	50 (BW3)

Dos valores da Tabela 13 é calculada a emissão indesejável em dBm/200MHz:

$$Emiss\tilde{a}o\ Indesej\tilde{a}vel = 10 * \log_{10}(BW1 * 10^{(0,1*LE1)} + BW2 * 10^{(0,1*LE2)} + BW3 * 10^{(0,1*LE3)}) = 6,25\text{ dBm} / 200\text{ MHz} \quad (8)$$

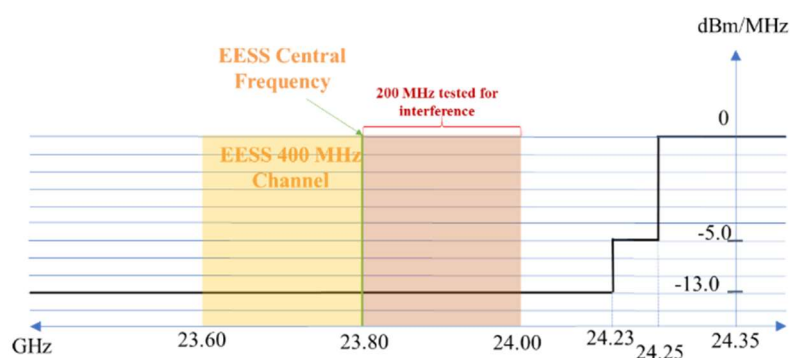


Figura 16 - Máscara de emissão indesejável do terminal de usuário IMT-2020 sobre a faixa de frequência de operação do EESS (Passivo)

Fonte: Document 5-1/478-E - Attachment 2 to Annex 3 to Task Group 5/1 Chairman's Report da UIT-R (13)

Da Figura 16 tiramos os valores da Tabela 14 abaixo:

Tabela 14 - Limite de emissão indesejável (TRP) para terminal do usuário

offset da frequência [MHz]	Limite de emissão [dBm/MHz]	largura de banda calculada [MHz]
$0 \leq \Delta f < 20$	-5 (LE1)	0 (BW1)
$20 \leq \Delta f < 400$	-13 (LE2)	150 (BW2)
$\Delta f > 400$ MHz	-13 (LE3)	50 (BW3)

Dos valores da Tabela 14 é calculada a emissão indesejável em dBm/200MHz:

$$Emissões\ Indesejáveis = 10 * \log_{10}(BW1 * 10^{(0,1*LE1)} + BW2 * 10^{(0,1*LE2)} + BW3 * 10^{(0,1*LE3)}) = 10,01\text{ dBm} / 200\text{ MHz} \quad (9)$$

Assim, para a Estação Rádio Base, a emissão indesejável produz 6,25 dBm / 200 MHz (-23,75 dB (W / 200 MHz)). Para o equipamento do usuário, a emissão espúria produz 10,01 dBm / 200 MHz (19,98 dB (W / 200 MHz)).

3.2.3. Resultados da interferência recebida pela estação espacial EESS (Passiva)

Os estudos foram realizados no Sensor F3 que foi considerado como o mais restritivo (13) utilizando o método de Monte Carlo na ferramenta de simulação SHARC. Como pode se observar do gráfico da Figura 17, considerando espaçamento $d / \lambda = 0,46$, os resultados obtidos dos sensores F2 e F8 tiveram resultados similares ou menos restritivos.

No eixo das ordenadas temos a probabilidade de a interferência ultrapassar a interferência em dBW / 200 MHz indicada no eixo das abscissas. Para o percentil de 0,1%, temos uma interferência de 152,35 dBW / 200 MHz para o sensor F3.

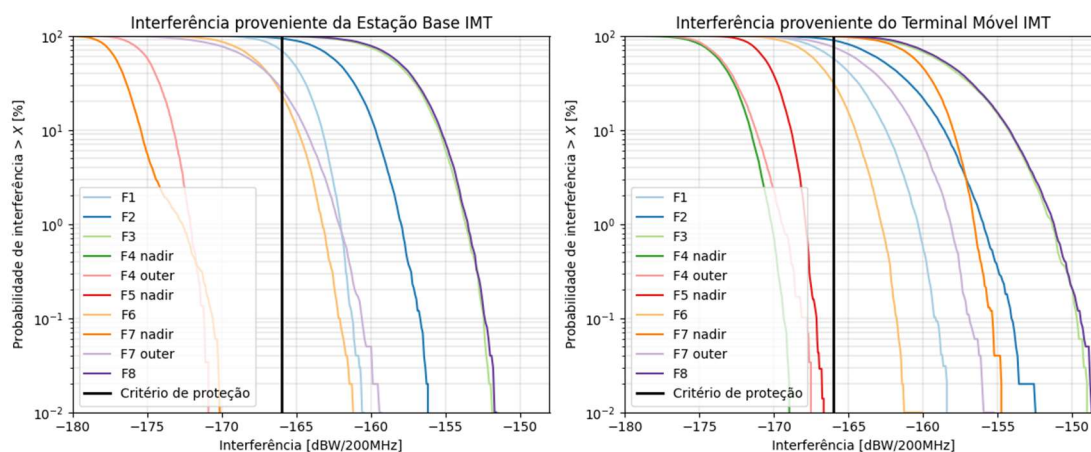


Figura 17 - Interferência dos sistemas IMT no EESS (Passivo) para cada sensor

A recomendação ITU-R RS.2017 (31) fornece os critérios de proteção para sistemas EESS (Passivos) na banda de 23,6 a 24 GHz. A largura de banda de referência é 200 MHz, o nível máximo de interferência é -166 dBW, a porcentagem de área ou tempo de nível de interferência permitido que pode ser excedido é 0,01%.

Tabela 15 - Margens para critérios de proteção passiva EESS (-166 dBW / 200 MHz em 0,01% do tempo)

	F1	F2	F3	F4 (nadir)	F4 (externo)	F5 (nadir)	F5 (externo)	F6	F7 (nadir)	F7 (externo)	F8
Margem ERB	-5,5	-10,0	-14,8	17,7	5,0	16,2		-4,8	4,1	-6,7	-14,3
Margem Terminal Móvel	-8,0	-13,6	-17,3	2,9	1,4	0,6		-4,9	-11,3	-10,2	-17,8

Tabela 16 - Limites de emissões indesejadas para atender aos critérios de proteção EESS (Passiva) em dBW / 200MHz

	F1	F2	F3	F4 (nadir)	F4 (externo)	F5 (nadir)	F5 (externo)	F6	F7 (nadir)	F7 (externo)	F8
Margem ERB	-29,3	-33,8	-38,6	-23,8	-23,8	-23,8	-23,8	-28,6	-23,8	-30,5	-38,1
Margem Terminal Móvel	-28,0	-33,6	-37,3	-20,0	-20,0	-20,0	-24,9	-24,9	-31,3	-30,2	-37,8

De acordo com a Recomendação ITU-R RS.2017 (31), a disponibilidade de dados é a porcentagem de área ou tempo para o qual os dados precisos estão disponíveis para uma área de medição de sensor especificada ou tempo de medição de sensor. Para um nível de 0,01% de uma área de 2.000.000 km² significa que, no máximo, uma superfície de 200 km² poderia aceitar exceder o nível de interferência. Já um nível de 0,1% significa que 2000 km² poderia aceitar exceder o nível de interferência.

Ademais, as recomendações ITU-R SA.609 (32) e ITU-R SA.1396 (33) estabelecem que: “Além disso, como os dados de propagação são geralmente apresentados na forma de uma porcentagem de tempo em que certas condições são excedidas, é necessário relacionar o tempo de interrupção com os dados de propagação. Para missões espaciais tripuladas, uma perda de mais de 5 minutos de comunicação durante períodos críticos afetaria seriamente a missão. No entanto, é comum que as condições de propagação sejam tais que a menor perda de transmissão entre duas estações persistirá por períodos muito mais longos do que 5 minutos. Portanto, para fornecer proteção que evite interferências por mais de 5 minutos por dia, é necessário considerar não apenas a pior hora do ano, mas também os piores 5 minutos dentro dessa hora. Isso é aproximadamente 0,001% do tempo. Para missões não tripuladas, onde a segurança da vida não é um fator, a porcentagem de referência de tempo é de 0,1%.” Assim, os estudos serão realizados no Sensor F3 que obteve os resultados mais restritivos.

3.3. METODOLOGIA APLICADA NAS SIMULAÇÕES

Esta seção descreve o cenário de simulação utilizado no estudo da coexistência entre sistemas 5G na faixa de frequência de 24,25 a 27,5 GHz e o Serviço de Exploração Terrestre por Satélite (Passivo) operando de 23,6 a 24 GHz.

3.3.1. Simulador SHARC

A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) desenvolveu, em cooperação com parceiros da indústria e da academia, uma ferramenta de simulação de código aberto, chamada SHARC, para apoiar estudos de compartilhamento e compatibilidade entre IMT e outros sistemas de radiocomunicação, de acordo com o enquadramento proposto pela Recomendação UIT-R M.2101 (2).

SHARC é um simulador estático de nível de sistema de coexistência 5G usando o método de Monte Carlo. Possui os principais recursos necessários para um simulador de nível de sistema comum, como formação de feixe de antena, controle de potência, alocação de blocos de recursos, entre outros. O simulador é escrito em Python e o código-fonte está disponível em GitHub <https://github.com/SIMULATOR-WG/SHARC> (34) e suas funcionalidades apresentadas por Souza et al (35). Com o SHARC, é possível estudar a coexistência do IMT 2020 com outros serviços, como EESS, FSS, sistema de plataforma de alta altitude (HAPS) e enlaces fixos ponto a ponto, entre outros.

O principal indicador de desempenho obtido a partir dessas simulações é a interferência agregada gerada pelas Estações Rádio Base IMT 2020 ou terminal do usuário no outro sistema e vice-versa. A relação agregada de interferência para ruído (I / N) é calculada e comparada com os critérios de proteção da estação espacial EESS (Passiva).

3.3.2. Fluxo da Simulação

Para calcular a interferência agregada de vários dispositivos 5G no satélite não geostacionário é necessário configurar uma simulação com uma grande quantidade de estações. No trabalho elaborado por Queiroz (36) é apresentado um diagrama de blocos do simulador SHARC implementado de acordo com a Recomendação UIT-R M.2101 (2). Os

passos de simulação e cálculos relevantes para este cenário específico são apresentados no fluxograma abaixo:

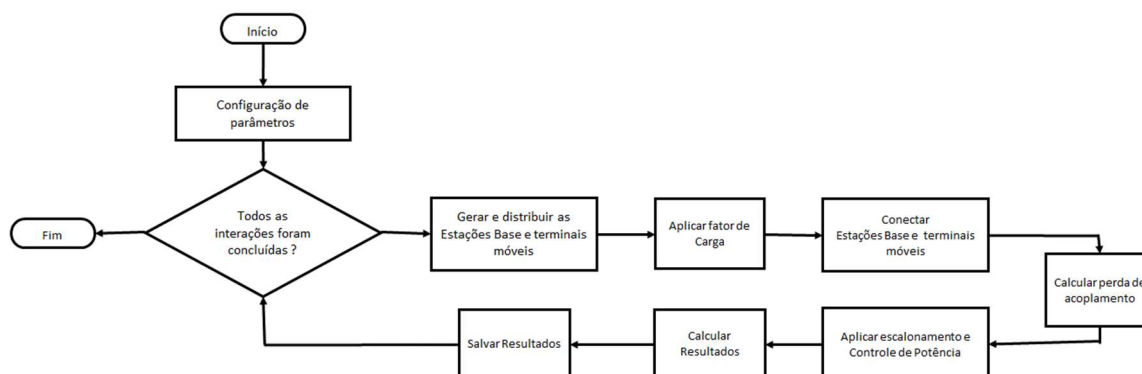


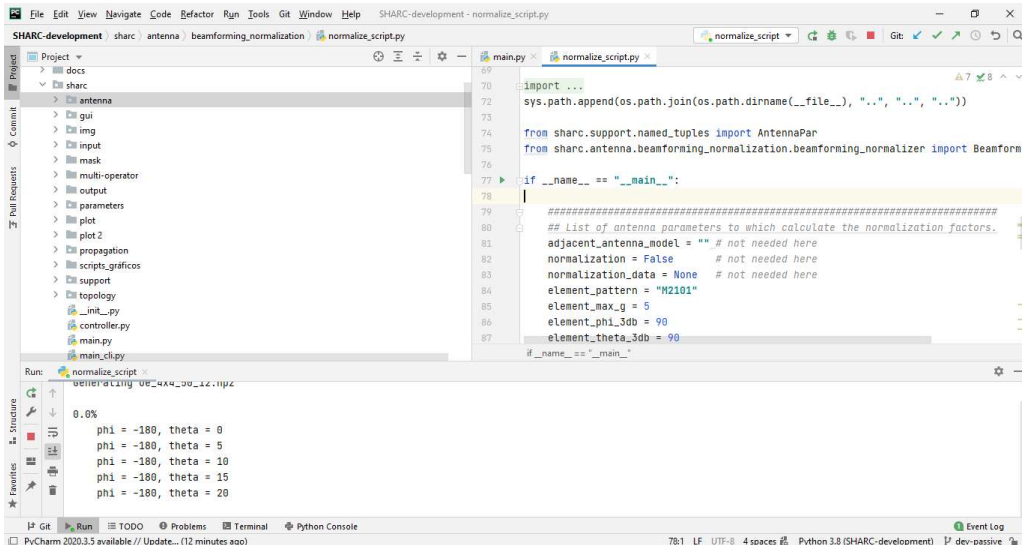
Figura 18 - Fluxograma da simulação
Fonte: QUEIROZ, 2019 (36)

O primeiro passo é a definição dos parâmetros de simulação. Uma vez iniciada a simulação, são geradas as estações do sistema IMT e do sistema interferido e a seguir elas são distribuídas. Em seguida, uma porcentagem fixa de células do sistema IMT é ativada. Essa porcentagem é chamada de fator de carga e representa a proporção de células que serão alocadas para transmissão no instante de tempo da iteração. Os terminais são conectados às suas respectivas Estações Rádio Base e a perda de acoplamento entre as estações simuladas é calculada. Por fim, o escalonamento e controle de potência são executados, seguido pelo cálculo e armazenamento dos resultados.

3.3.3. Configuração dos parâmetros de entrada

Inicialmente são criados arquivos de parâmetros no formato *.txt para cada cenário de simulação desejado. No Anexo I encontra-se um exemplo de arquivo de parâmetros para um cenário de simulação de convivência entre sistema EESS (Passivo) e sistema IMT operando em *downlink* com antenas operando em conformação de feixes, com espaçamento de antenas $d/\lambda = 0,46$. Para os estudos de convivência entre os sistemas IMT e EESS (Passivos) foram desenvolvidos vários scripts de simulação.

Inicialmente foi criado o arquivo de normalização para cada cenário de simulação com as antenas IMT. A figura abaixo mostra a tela em Python criando o arquivo de normalização com os parâmetros referentes ao cenário de antenas IMT do Anexo I. Todos os diagramas de radiação utilizados pelas estações do sistema IMT passam por um processo de normalização. Isso se dá devido ao fato de que o ganho total integrado dos modelos de radiação pode ser diferente de zero. Um ganho total integrado diferente de zero significa que o painel de antenas está perdendo ou gerando potência ao radiar ou receber o sinal transmitido. Como perdas no painel já são consideradas no cálculo da perda de acoplamento, o ideal é que o ganho total integrado seja zero para que, descartadas as perdas ôhmicas consideradas separadamente, o painel irradie ou absorva a mesma quantidade de potência que lhe foi entregue.



```
File Edit View Navigate Code Refactor Run Tools Git Window Help SHARC-development - normalize_script.py
SHARC-development | sharc | antenna | beamforming_normalization | normalize_script.py
main.py | normalize_script.py
69
70 import ...
71 sys.path.append(os.path.join(os.path.dirname(__file__), "..", "..", ".."))
72
73
74 from sharc.support.named_tuples import AntennaPar
75 from sharc.antenna.beamforming_normalization.beamforming_normalizer import BeamForm
76
77
78 if __name__ == "__main__":
79
80     #####
81     ## List of antenna parameters to which calculate the normalization factors.
82     adjacent_antenna_model = "" # not needed here
83     normalization_data = None # not needed here
84     element_pattern = "H2101"
85     element_max_g = 5
86     element_phi_3db = 90
87     element_theta_3db = 90
88     if __name__ == "__main__":
89
90
Run: normalize_script
0.0%
phi = -180, theta = 0
phi = -180, theta = 5
phi = -180, theta = 10
phi = -180, theta = 15
phi = -180, theta = 20
Python Console
PyCharm 2020.3.5 available // Update... (12 minutes ago) 78:1 L F UTF-8 4 spaces Python 3.8 (SHARC-development) dev-passive
```

Figura 19 - Normalização de antenas IMT

A seguir é executado o script para a simulação dos cenários que utilizará os arquivos de normalização das antenas IMT criados na etapa anterior. A figura abaixo mostra a tela de entrada no programa Python simulando um cenário de convivência conforme os parâmetros do Anexo I.

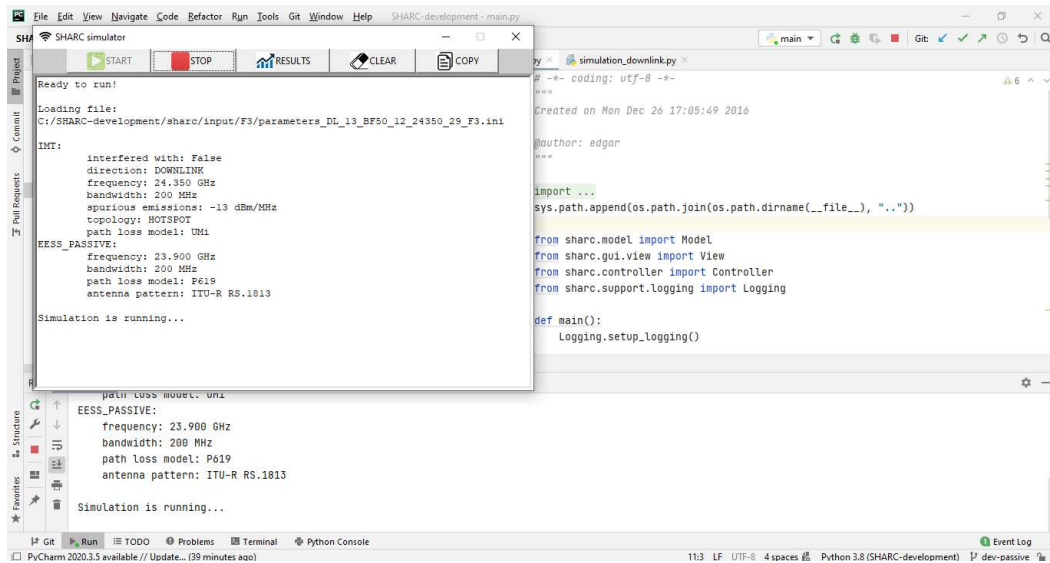


Figura 20 - Tela de simulação

Os resultados de simulação de cada um desses cenários são salvos em uma pasta de saída com os resultados das CDFs em formato *.txt para os seguintes indicadores intermediários que foram usados neste estudo.

- (IMT) CDF do ganho da antena ERB em direção ao terminal do usuário
- (IMT) CDF de perda de acoplamento
- (IMT) CDF de DL SINR
- (IMT) CDF de throughput DL
- (IMT) CDF de potência de transmissão DL
- (IMT) CDF do ganho da antena da estação IMT para o sistema
- (IMT) CDF de perda de percurso
- (IMT) CDF do ganho da antena do terminal do usuário em direção à ERB
- (SYS) CDF de IMT para perda de percurso do sistema
- (SYS) CDF de ganho de antena do sistema para estações IMT
- (SYS) CDF do sistema INR
- (SYS) CDF da potência de interferência do sistema proveniente do IMT DL
- (SYS) Amostras INR

A Figura 21 mostra um exemplo de curva para resultados intermediários para a *Cumulative Distribution Function* (CDF) do ganho da antena da Estação IMT em direção ao Sistema EESS (Passivo). O eixo das ordenadas mostra a probabilidade de o ganho da antena ser menor que o ganho da antena indicada pelo eixo das abscissas.

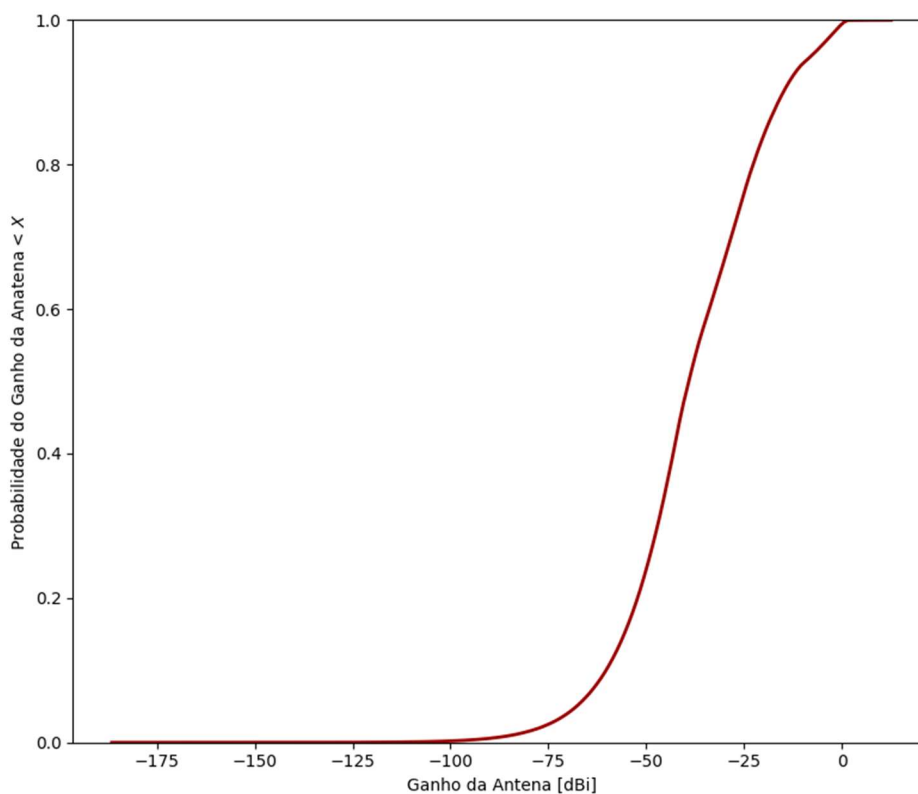


Figura 21 - CDF do ganho da antena IMT para o Sistema EESS (Passivo)

A Figura 22 mostra um exemplo de curva para resultados intermediários para a *Cumulative Distribution Function* (CDF) da perda por acoplamento entre duas estações IMT. A perda de acoplamento inclui não só perdas de propagação, mas também perdas ôhmicas nas antenas de transmissão e recepção, perdas nos cabos de alimentação, perdas por absorção do corpo dos usuários, perdas de polarização dentre outras. O eixo das ordenadas mostra a probabilidade de a perda por acoplamento ser menor que a indicada pelo eixo das abscissas.

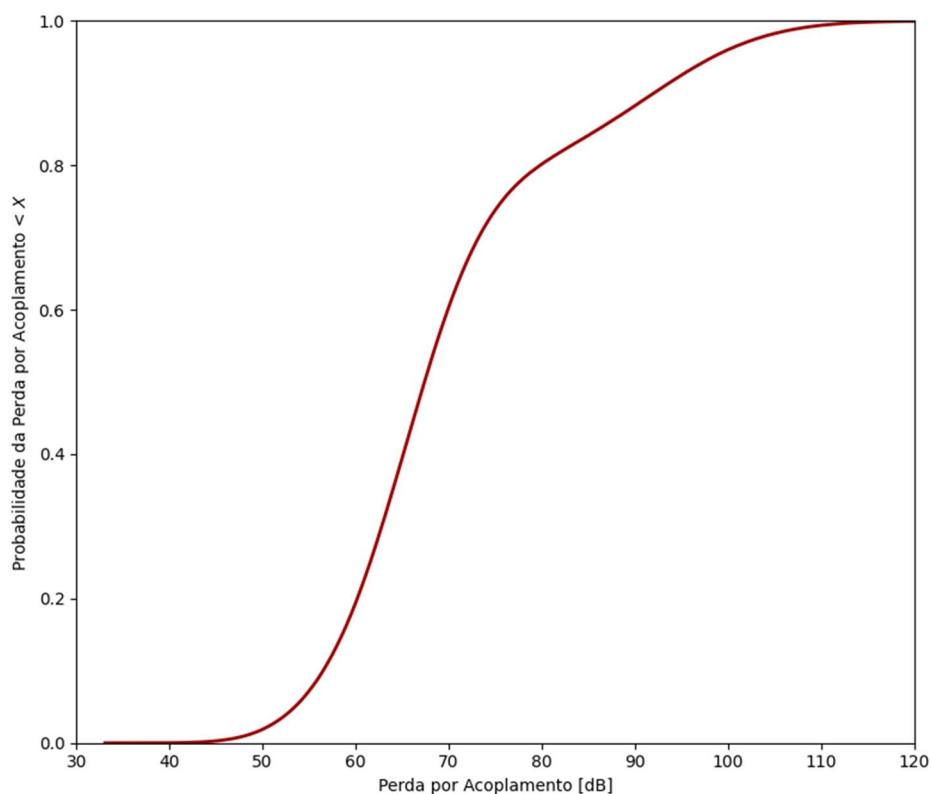


Figura 22 - CDF de perda de acoplamento

Para as análises deste estudo foram desenvolvidos scripts em Python específicos para cada cenário de interferência que utilizam as CDFs acima relacionadas ou executam novos cenários utilizando como entrada arquivos de parâmetros conforme modelo do Anexo I.

3.3.4. Geração e distribuição das estações

Em cada iteração de simulação, os *hotspots* das Estações Rádio Base e terminais do usuário são gerados aleatoriamente e distribuídos dentro de um cenário de simulação, conforme especificado na Recomendação ITU-R M.2101 (2), de forma a padronizar os estudos realizados com outros feitos pelo *Task Group 5/1* da UIT e permitir a comparação entre eles.

A avaliação da interferência agregada gerada por *hotspots* 5G está focada no cenário de simulação da Figura 23 em um satélite não geostacionário, operando a 828 km de altitude, com ângulo de incidência no centro da pegada de $53,63^\circ$.

A Figura 23 mostra um exemplo da topologia de rede IMT, que consiste de um *cluster* de 19 macro células, indicadas pelos pontos pretos, com 3 setores por célula e 356 *hotspots* espalhados por uma área de 169 km². Cada *hotspot* atende 3 terminais de usuários simultaneamente, conforme (26). A implantação do 5G em ondas milimétricas provavelmente será baseada em *hotspots*, que cobrirão uma fração dos cenários urbanos e suburbanos. O raio de alcance desses *hotspots* é de aproximadamente 100 metros (5) e a expectativa é que a comunicação se dê por visada direta ou por reflexão.

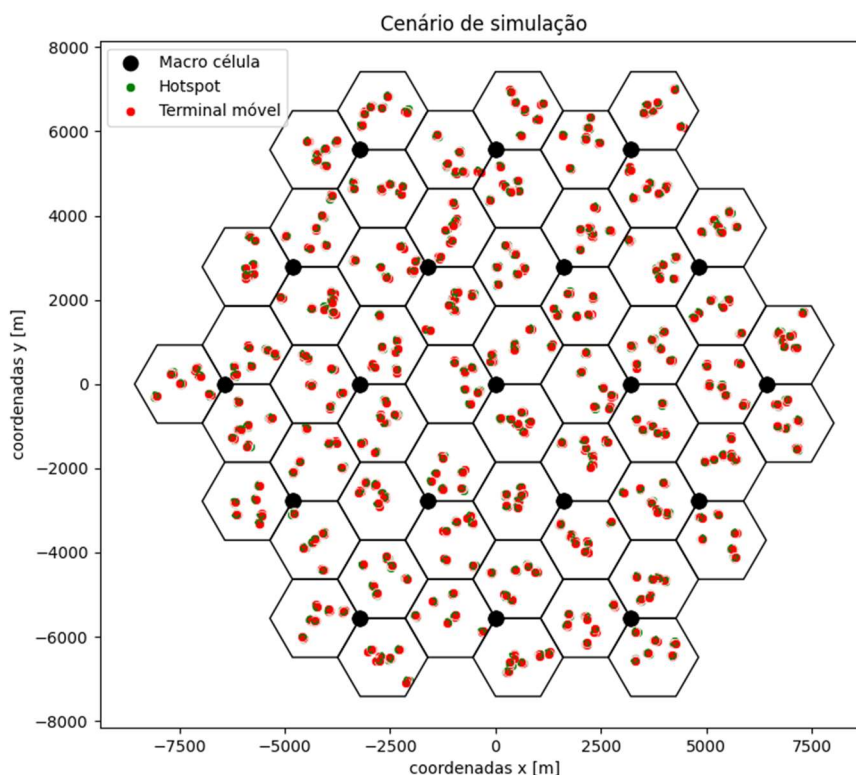


Figura 23 - Topologia de rede IMT Simulada

Para o terminal do usuário, o diagrama de radiação da antena na situação de banda de frequência adjacente foi considerado aleatoriamente em elevação entre os ângulos -90° a 90° e em azimute entre os ângulos de -60° a $+60^\circ$ na direção da Estação Rádio Base conforme

Documento 5-1/92-E da UIT sobre Parâmetros de sistemas e modelos de propagação a serem utilizados em estudos compartilhamento e compatibilidade (37).

A expectativa é que nas áreas urbanas e suburbanas mais densas, a distribuição da localização do terminal do usuário dentro da área do *hotspot* seja com uma distribuição *Rayleigh* e uma distribuição log-normal foi modelada para o ambiente suburbano em espaço aberto.

Nos estudos no Documento 5-1/92-E da UIT (37), foi apresentado que a distribuição log-normal falhava em representar os locais dos usuários nos primeiros metros próximos da antena conforme representado na curva laranja da Figura 24. Já a distribuição *Rayleigh* já começava a representar a distribuição dos usuários assim que começava a se distanciar da antena, conforme representado na curva azul da Figura 24.

Em uma área de implementação suburbana, a distribuição log-normal é coerente porque as antenas das Estações Rádio Base costumam estar em torres de altura considerável e é comum não termos usuários localizados muito próximos da antena. Na análise do sistema IMT com *hotspots* é possível termos usuários localizados logo abaixo da antena.

A função de densidade de probabilidade da distribuição de *Rayleigh* é (27):

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, x \geq 0 \quad (10)$$

Em que σ é o parâmetro de escala da distribuição. A função de distribuição cumulativa é:

$$F(x; \sigma) = 1 - e^{-x^2/(2\sigma^2)}, \text{ para } x \in [0, \infty) \quad (11)$$

Assim, tendo em vista que a implementação do IMT-2020 em ondas milimétricas provavelmente será com *hotspots*, em que teremos usuários logo abaixo dos sistemas radiantes e com uma probabilidade maior de concentração a aproximadamente 32 metros da antena, foi utilizada a distribuição de *Rayleigh* com parâmetro de escala $\sigma_d = 32$ m para a distância entre o terminal do usuário e ponto de acesso mais próximo, e uma distribuição normal para o azimute entre o terminal do usuário e ponto de acesso (dentro do intervalo de $\pm 60^\circ$), com média $\mu_a = 0^\circ$ e desvio padrão $\sigma_a = 30^\circ$. Este setor angular contém 95% dos valores normalmente distribuídos, resultando em 2,5% dos valores finais restantes em ambos os lados. Os ângulos de elevação do terminal do usuário são considerados uniformemente distribuídos dentro da faixa

de $\pm 90^\circ$. A altura das Estações Rádio Base é de 6 metros e dos terminais de usuário de 1,5 metros.

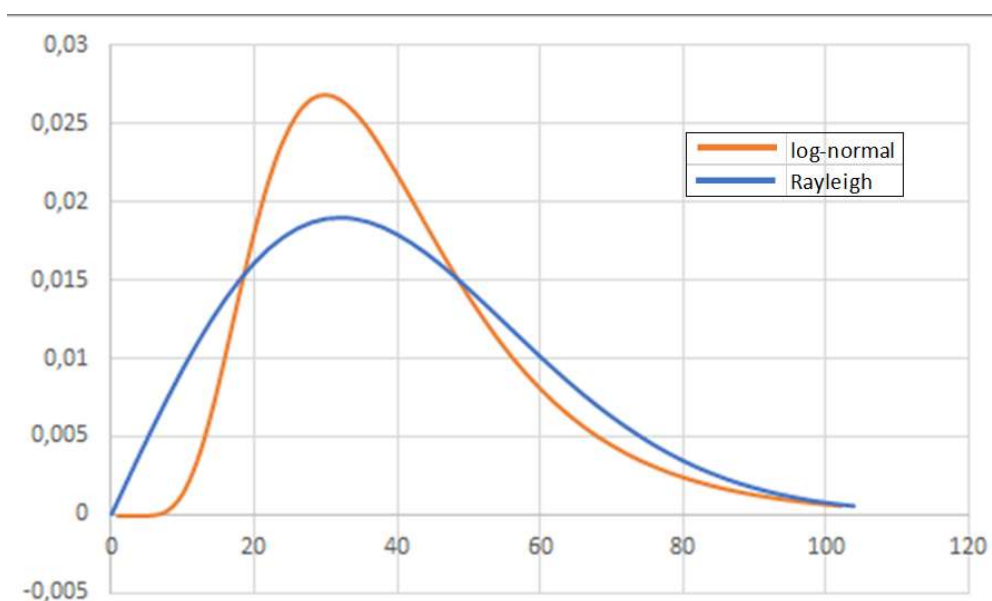


Figura 24 - Distribuição dos usuários

Fonte: Document 5-1/92-E - System Parameters and Propagation Models to be used in Sharing and Compatibility Studies, International Telecommunication Union da UIT-R (37)

Os modelos *Rayleigh* e *log-normal* foram ajustados para que a probabilidade de se ter usuários além de 100 metros da antena fosse menor do que 1% (5).

De acordo com o documento do *Task Group 5/1* nº 36 (26), os valores de densidade de implantação D_I , ou seja, o número de estações por unidade de área, podem ser calculados da seguinte forma:

$$D_I = D_s * R_a * R_b \quad (12)$$

onde D_s é o valor de densidade para a área de *hotspot* ao ar livre, R_a é a proporção de áreas de *hotspot* para áreas construídas e R_b é a proporção de áreas construídas para área total da região

em estudo. Neste estudo, assume-se um valor para R_a de 7% em ambientes urbanos e 3% em ambientes suburbanos como uma proporção típica de implantações de *hotspots* em comparação com a área construída de uma cidade. Além disso, é assumido um valor para R_b de 5% como uma proporção típica de áreas construídas dentro de uma região conforme o documento do *Task Group 5/1* nº 36 (26). O valor D_1 é um ajuste para áreas extensas, como um país ou uma região, a fim de levar em consideração grandes áreas fora das áreas construídas sem implantação de Estações Rádio Base IMT-2020 em ondas milimétricas.

Ao considerar as cidades / áreas construídas, as áreas de *hotspot* com implantação IMT-2020 em frequências acima de 24 GHz em FR2 representarão apenas uma parte das áreas com implantação do 5G (5). Haverá áreas significativas dentro das cidades / áreas construídas utilizando outras faixas de frequência abaixo de 24 GHz em FR1 que não geram interferência na banda de frequência EESS (Passiva) de 23,6 a 24 GHz.

3.3.5. Fator de carga da rede

Como o simulador utilizado é estático, algumas das estações 5G são desativadas para se simular o agendamento de transmissões no tempo. Para isso, é aplicado um fator de carga, que define a porcentagem de enlaces ativos no instante de tempo da iteração.

Os fatores de carga da rede refletem a atividade média da Estação Rádio Base IMT. A fim de fornecer a qualidade de serviço necessária e adequada, as redes IMT são projetadas para evitar congestionamentos indevidos, de modo que, para uma rede como um todo, a maioria das células não sejam sobrecarregadas simultaneamente e apenas uma pequena porcentagem das células seja fortemente carregada em qualquer ponto específico no tempo.

Assim, como fator de carga na rede foi adotado que para cada Estação Rádio Base sempre haverá três terminais do usuário ativados aleatoriamente na rede.

3.3.6. Perda de acoplamento

De acordo com Cox (38), pode se dizer que a perda de acoplamento entre duas estações é a razão entre a potência do sinal transmitido por uma estação e a potência do sinal recebido por outra estação, podendo as estações pertencerem ou não ao mesmo sistema. Dessa forma, a perda de acoplamento inclui não só as perdas de propagação, mas também pode englobar perdas ôhmicas nas antenas de transmissão e recepção, perdas nos cabos de alimentação, perdas por absorção do corpo dos usuários, perdas de polarização e outras. Assim, a perda de acoplamento, ou CL do inglês *coupling loss* pode ser definida como (2):

$$CL = PL - G_{tx} - G_{rx} + L_{ohm, tx} + L_{ohm, rx} + L_{pol} + L_{body} \quad (13)$$

Na equação, PL (*path loss*) representa a perda de propagação entre as estações, G_{tx} e G_{rx} são respectivamente os ganhos das antenas de transmissão e recepção. $L_{ohm, tx}$ e $L_{ohm, rx}$ são as perdas ôhmicas tanto nas antenas como nos cabos de alimentação das antenas do transmissor e do receptor e foram definidas em 3 dB. L_{pol} é uma perda de polarização e foram definidas em 3 dB e L_{body} constitui uma perda por absorção do corpo do usuário, definido em 4 dB.

3.3.7. Perda de percurso (PL)

O cálculo da perda de percurso irá depender da probabilidade de o enlace ter linha de visada, *Line of Sight* (LOS), ou não ter linha de visada (NLOS). A determinação se o percurso é LOS ou NLOS possui uma probabilidade associada, cuja definição é dada por uma expressão que possui como parâmetro a distância do enlace. Ou seja, quanto menor o enlace, maior a probabilidade de haver linha de visada entre a Estação Rádio Base IMT e o terminal de usuário.

De acordo com Asplund et al (30) o modelo de perda de percurso, ou *Path Loss* (PL) pode ser representado pela fórmula:

$$PL(dB) = A + B \cdot \log_{10}(r) + G \cdot \log_{10}(f) + \sigma \quad (14)$$

Sendo que A é um offset, B é a inclinação em relação à distância, G representa a dependência da frequência em relação a perda de percurso e σ representa o desvanecimento.

O *Technical Report 3GPP TR 38.901 V16.0.0 (39)* do *3rd Generation Partnership Project* trata de Estudos de Modelos de Canal para frequências de 0.5 a 100 GHz (*Release 16*). A Figura 25 mostra as definições de distância utilizadas para cálculo de perdas de percurso.

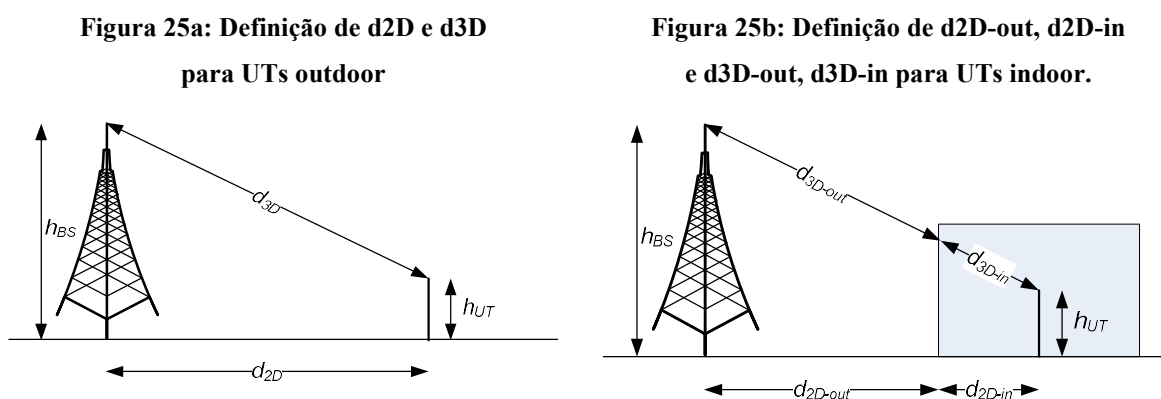


Figura 25 - Definição de distâncias para perdas de caminho

Fonte: Technical Report 3GPP TR 38.901 (39)

Os cenários de UMi incluem áreas abertas de alta densidade de usuários e desfiladeiros de rua com alturas das ERBs abaixo dos telhados (por exemplo, 3-20 m), alturas do terminal do usuário, do inglês *User Terminal (UT)* ao nível do solo (por exemplo, 1,5 m) e distâncias entre locais (ISDs) de 200 m ou menos, conforme especificado no *Technical Report 3GPP TR 36.873 (40)* e no *Report ITU-R M.2135-1 (41)*. No documento 3GPP TR 38.901 (39) o *User Terminal (UT)* tem o mesmo significado que o *User Equipment (UE)* aplicado nos documentos da UIT.

A altura da antena é assumida como 10 metros no modelo de probabilidade UMi LOS (39) e o modelo utilizado é o 3GPP / ITU d_1 / d_2 , conforme *Technical Report 3GPP TR 36.873 (40)* e *Report ITU-R M.2135-1 (41)*, sendo d_1 e d_2 parâmetros de ajuste de curva. De acordo com o *Technical Report TR 38.901 (39)*, os parâmetros do modelo utilizados foram $d_1 = 18$ m e $d_2 = 36$ m para UMi. Para um link entre uma ERB externa e um terminal de usuário interno, o modelo usa a distância externa d_{2D-out} , que é a distância da ERB à superfície do edifício interno, para substituir d_{2D} , conforme Figura 25.

De acordo com o *Report ITU-R M.2135-1 (41)* o modelo de perda de percurso sem visada direta, do inglês *Non-line-of-sight (NLoS)* para o cenário UMi é dependente de duas distâncias, d_1 e d_2 no caso da grade de *Manhattan*. Essas distâncias são definidas em relação a uma malha de ruas retangular, conforme ilustrado na Figura 26, onde o terminal do usuário é mostrado se movendo ao longo de uma rua perpendicular à rua em que a Estação Rádio Base

(ERB) está localizada (a rua com LoS). d_1 é a distância da ERB ao centro da rua perpendicular e d_2 é a distância do terminal do usuário ao longo da rua perpendicular, medida a partir do centro da rua com LoS.

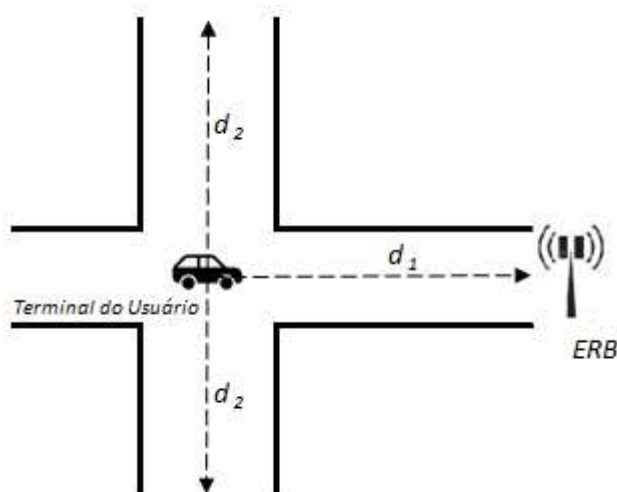


Figura 26 - Geometria para modelo de perda de percurso $d_1 - d_2$

Assim, de acordo com *Technical Report 3GPP TR 38.901 V16.0.0 (39)* a fórmula para cálculo de probabilidade de linha de visada, ou *Line-Of-Sight (LOS)* para UMi é:

$$Pr_{LOS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D-out} \leq 18m \\ \frac{18}{d_{2D-out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D-out}}\right) & , 18m < d_{2D-out} \end{cases} \quad (15)$$

Onde

D_{2D-out} é a distância 2D (em solo) entre a antena da Estação Rádio Base e a edificação, ou seja, relativa ao trecho outdoor.

Na equação 15 acima é utilizada a distância d_1 igual a 18 metros. Na Figura 27 temos a probabilidade de linha de visada em função da distância entre a Estação Rádio Base e o terminal do usuário. Como visto anteriormente, em uma implementação de 5G em *hotspots* a concentração de usuários ocorrerá a aproximadamente 32 metros de distância da Estação Rádio Base. Para distância d_1 igual a 18 metros teríamos uma probabilidade de linha de visada de 75% a uma distância de aproximadamente 32 metros entre a ERB e o terminal do usuário. Se fosse aplicado uma distância d_1 igual a 29 metros em vez de 18 metros, a probabilidade de linha de visada subiria para 96%. Da mesma forma, para uma distância d_1 igual 18 metros teríamos uma

probabilidade de área de cobertura de 66%, que subiria para 79% com uma distância d_1 igual 29 metros.

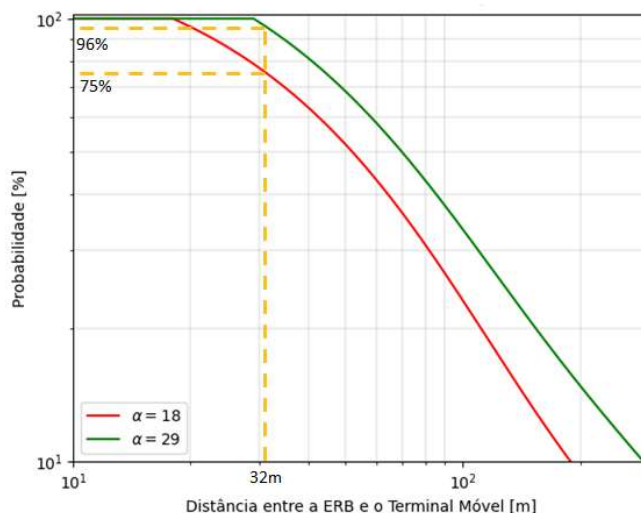


Figura 27 - Probabilidade de LoS do link ERB para Terminal de Usuário

O feixe de radiação deve idealmente apontar para o local onde há a maior expectativa de concentração de usuários. A probabilidade de LoS de 75% pode ser baixa demais para o centro da distribuição de um *hotspot*. Uma probabilidade de LoS mais alta seria mais recomendável. Assim, a distância de 18 metros poderia estar muito próxima do terminal do usuário e a distância de 29 metros poderia ser mais razoável, conforme vem sendo discutido no WP5D e mostrado nas Figuras 27, 28 e 29.

Assim, na proposta em discussão na UIT, poderia se aplicar um fator de ajuste α , em vez de um valor fixo de 18m para d_1 conforme equação (16) abaixo. Até uma definição final do valor que mais atende as condições reais de implementação, seria mantido esse fator de ajuste α na equação.

$$Pr_{LoS} \begin{cases} 1 & , d \leq \alpha m \\ \frac{\alpha}{d} + \exp\left(\frac{-d}{36}\right) \left(1 - \frac{\alpha}{d}\right) & , \alpha m < d \end{cases} \quad (16)$$

Utilizando um fator $\alpha = 29$, além da probabilidade de área de cobertura em LoS subir de 65% para 79% obtém-se uma melhoria na perda de acoplamento entre a ERB e o terminal do usuário e na potência de saída do terminal do usuário. Os gráficos abaixo simulados na ferramenta SHARC mostram esse impacto da probabilidade de cobertura em LoS na área de

cobertura do IMT. A Figura 28 mostra a probabilidade da perda de acoplamento entre a Estação Rádio Base e o terminal do usuário e a probabilidade de a potência de saída do terminal do usuário ser menor do que a indicada na abscissa.

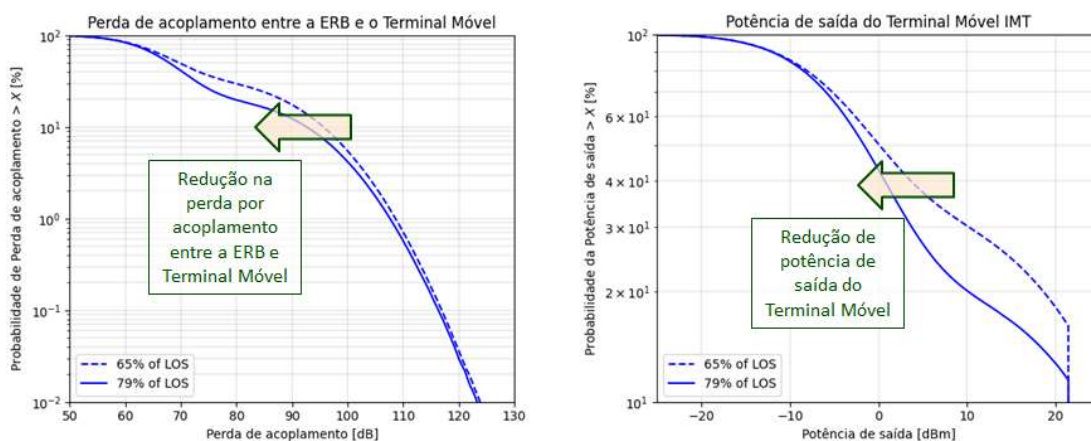


Figura 28 - Impacto da perda de acoplamento de LoS no desempenho de IMT

O gráfico abaixo mostra o impacto na probabilidade de LoS na interferência gerada pelo terminal do usuário para o sensor F3.

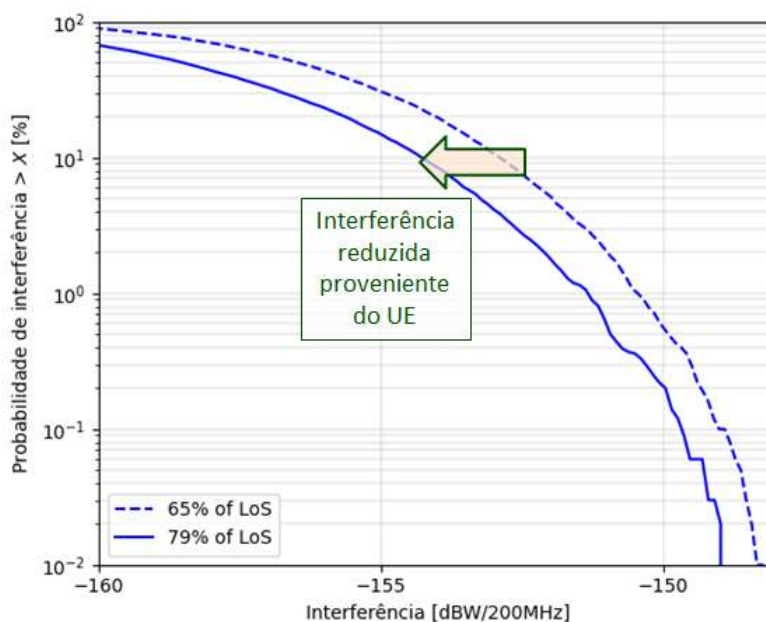


Figura 29 - Impacto da probabilidade de LoS na interferência do Terminal do Usuário IMT no sensor

F3

A proposta em ajustar equação (16) tem como objetivo tornar as simulações mais adequadas as condições de implementação. Por que uma operadora de telecomunicações colocaria uma Estação Rádio Base em uma posição "ruim" se ele quiser cobrir uma área de *hotspot*? Com esse ajuste o LoS desejado para o *hotspot* subiria para 96% e com isso ter-se-ia uma probabilidade de cobertura em LoS melhor e uma consequência indireta seria uma redução na interferência do terminal do usuário para o sensor F3.

3.3.8. Conformação de feixe e diagramas de radiação

As Estações Rádio Base podem operar tanto com um painel, que permite a utilização de conformação de feixes, quanto com antenas setorizadas e omnidirecionais, enquanto os terminais de usuário podem operar com antenas omnidirecionais e, também, com painel de antenas. A conformação de feixes, segundo Stutzman (18), depende da direção de chegada da onda incidente, então para um sinal que chega na antena vindo da direção (θ, φ) , portanto o ganho de um elemento de antena, em dB, pode ser dado por:

$$A_E(\varphi, \theta) = G_{E,max} - \min \{ -[A_{E,H}(\varphi) + A_{E,V}(\theta)], A_m \} \quad (17)$$

Na equação, φ e θ representam a direção de azimute e elevação no sistema de coordenadas do painel de antenas, como representado na Figura 5. $G_{E,max}$ é o ganho máximo do elemento de antena, $A_{E,V}$ e $A_{E,H}$ são os ganhos vertical e horizontal e A_m é a relação frente-costa horizontal do elemento.

Assim, o ganho horizontal, em dB, pode ser dado por:

$$A_{E,H}(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \text{ dB} \quad (18)$$

Sendo que φ_{3dB} é o ângulo de abertura horizontal de 3dB do feixe. O ganho vertical, em dB pode ser dado por:

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta-90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_V \right] \text{ dB} \quad (19)$$

No qual $\theta_{3\text{dB}}$ é a abertura vertical de 3dB e SLA_V é a atenuação vertical dos lóbulos laterais do elemento de antena.

Os diagramas de radiação para $A_{E,V}(\theta)$ e $A_{E,H}(\varphi)$ estão plotados na Figura 30a para $\theta_{3\text{dB}} = 65^\circ$, $\text{SLA}_V = 30$ dB, e na Figura 29b para $\theta_{3\text{dB}} = 65^\circ$ e $A_m = 30$ dB.

Figura 30a - $A_{E,V}(\theta)$

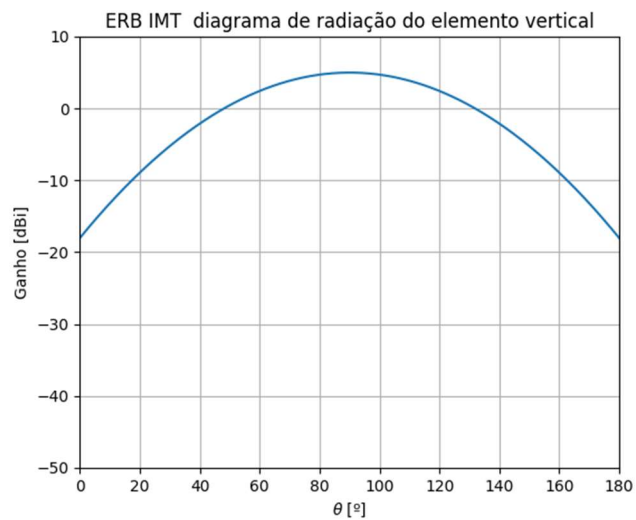


Figura 30b - $A_{E,H}(\varphi)$

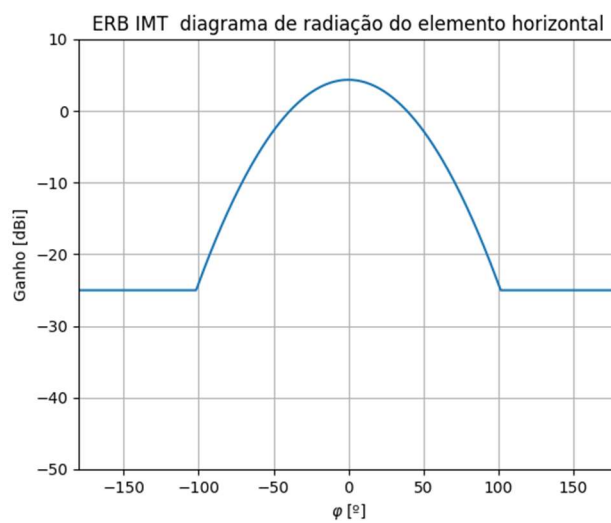


Figura 30 - Diagramas de radiação

Assim, o ganho do i -ésimo feixe criado pelo painel de antenas pode ser dado por:

$$A_{A,Beam_i}(\theta, \phi) = A_E(\theta, \phi) + 10 \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{i,n,m} v_{n,m} \right|^2 \right) \quad (20)$$

No qual N_H e N_V representam o número de linhas e colunas da matriz de antenas do painel.

O fator de matriz para uma antena de matriz plana pode ser representado por \tilde{W} conforme Balanis e Ioannides (29);

$$\tilde{W} = W \cdot V \quad (21)$$

em que V é a mudança de fase devido ao posicionamento da matriz, que pode ser representado como

$$V = \left[v_{1,1}, v_{1,2}, \dots, v_{1,N_V}, \dots, v_{N_H,1}, v_{N_H,2}, \dots, v_{N_H,N_V} \right]^T, \quad (22)$$

$$v_{m,n} = \exp \left(i \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \cos(\theta) + (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \right) \right), \quad (23)$$

$$m = 1, 2, \dots, N_H; n = 1, 2, \dots, N_V;$$

Em que W é o fator de ponderação, que fornece controle dos níveis do lóbulo lateral e também pode fornecer direcionamento elétrico, tanto horizontal quanto vertical. Para simplificar, a amplitude do vetor de ponderação é considerada idêntica para cada elemento de radiação. A fase do vetor de ponderação é usada para implementar a direção elétrica e depende do ângulo de direção horizontal e vertical necessário e do espaçamento do elemento.

$$W = \left[w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,N_V}, \dots, w_{N_H,1}, w_{N_H,2}, \dots, w_{N_H,N_V} \right]^T \quad (24)$$

$$w_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left(i \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \sin(\theta_{\text{tilt}}) - (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \cos(\theta_{\text{tilt}}) \cdot \sin(\phi_{\text{escan}}) \right) \right), \quad (25)$$

$$m = 1, 2, \dots, N_H; n = 1, 2, \dots, N_V;$$

Em que θ_{tilt} é a direção elétrica inclinada com inclinação para baixo e ϕ_{escan} é a direção elétrica horizontal, enquanto $w_{i,n,m}$ é definido como vetor de pesos e $v_{n,m}$ é o vetor de superposição.

Assim, j é a unidade imaginária ($j = \sqrt{-1}$), d_v é o espaçamento vertical entre os elementos de antena, d_h o espaçamento horizontal entre os elementos e λ é o comprimento de onda da transmissão. As variáveis θ_{tilt} e φ_{escan} correspondem à direção de apontamento do i -ésimo feixe e têm impacto direto no diagrama de radiação do feixe.

3.3.9. Modelos de propagação e de canais aplicados

Este estudo analisa a compatibilidade dos sistemas IMT na faixa de frequência de 24,25 a 27,55 GHz e o EESS (Passivo) em faixas de frequência adjacentes (23,6-24 GHz). Parâmetros técnicos detalhados dos sistemas IMT-2020 foram obtidos no Documento 5 1/36 (26). Os parâmetros dos sistemas EESS (Passivos) foram obtidos no Documento 5 1/29 (42). Os modelos de propagação usados foram aqueles especificados no Documento 5-1 / 38 (43).

No estudo as simulações levaram em consideração os mecanismos de propagação aplicáveis ao percurso do sinal interferente, emitido pelas estações IMT até os sensores EESS (Passivos), como a Recomendação ITU-R P.452 (44), que trata de procedimentos para predição de interferência entre estações na superfície terrena em frequências acima de 0,1 GHz, bem como a Recomendação ITU-R P.2108 (45), que define os métodos para calcular perdas por obstruções (*clutter loss*). A Recomendação ITU-R P.2108 (45) descreve *clutter* como obstáculos, como edifícios ou vegetação.

Se o IMT-2020 for implantado em um ambiente interno, a perda incorrida conforme o sinal passa pelas paredes do edifício deve ser considerada. A Recomendação ITU-R P.2109 (46) fornece um modelo para perda de entrada de edifício. Em geral, é necessário usar vários dados de construção, como a espessura da parede, o meio e assim por diante, para calcular a perda de entrada do edifício. No entanto, caracterizar diferentes tipos de edifícios não é apropriado para estudos de compartilhamento espectral, porque requer muitos dados e cálculos. Portanto, a Recomendação ITU-R P.2109 propôs um modelo para calcular a probabilidade de perdas de penetração induzidas em edifícios na faixa de 0,08 a 100 GHz.

Com relação a atenuação devido a gases atmosféricos, a Recomendação ITU-R P.619-4 (47) apresenta um modelo que calcula as perdas atmosféricas considerando várias variáveis, altura da antena IMT-2020, ângulo de elevação, volume de vapor de água, pressão do ar e

temperatura e atenuação devido à absorção por gases atmosféricos como oxigênio, vapor d'água e monóxido de carbono.

Os modelos de canal do IMT-2020 foram desenvolvidos para atender os seguintes cenários de atendimento:

- Cobertura de base urbana: um ambiente macro celular urbano que visa a cobertura contínua de pedestres até usuários de veículos rápidos.

- Micro celular: um ambiente micro celular urbano com maior densidade de usuários com foco em pedestres e usuários de veículos lentos.

- Interior: um ambiente interno direcionado a células isoladas em escritórios e / ou em *hotspot* com base em usuários estacionários e pedestres.

- Alta velocidade: um ambiente macro celular com veículos e trens de alta velocidade.

Assim, para cada cenário de atendimento foi utilizado um modelo de canal, conforme a tabela 17 abaixo.

Tabela 17 - Cenários de atendimento e modelos de canais

	Cobertura de base urbana	Microcellular	Indoor	Alta velocidade
Cenário de Atendimento	Ambiente macro-celular urbano	Ambiente micro-celular urbano	Cenário hotspot indoor	Cenário macro-celular rural
Modelo de Canal	UMa Urban macro (LoS, NLoS)	UMi Urban micro (LoS, NLoS, Outdoor-to-indoor)	InH Indoor hotspot (LoS, NLoS)	RMa Rural macro (LoS, NLoS)

Fonte: Report ITU-R M.2135-1 (41)

Em relação ao modelo de canal móvel foi utilizado o *Urban Micro Street Canyon – Umi* (Cânion de avenidas Micro-urbano) para descrever o canal móvel na 3GPP TR 38.900 (48), também descrito no Relatório ITU-R M.2412 (49).

Para a perda de propagação entre Estações Rádio Base, são utilizadas as curvas de linha de visada LoS e sem linha de visada NLoS da Recomendação ITU-R P.1411 (50) com probabilidade de linha de visada igual à probabilidade de linha de visada entre Estações Rádio Base e Terminal do Usuário.

A recomendação ITU-R RS.2017 (31) fornece os critérios de proteção para sistemas EESS (Passivos) na banda 23,6 a 24 GHz. A largura de banda de referência é 200 MHz, o nível máximo de interferência é -166 dBW. Durante os estudos do TG 5/1, houve muita discussão sobre se a área máxima ou porcentagem de tempo, em que o nível de interferência era permitido acima do limiar, deveria ser 1%, 0,1% ou 0,01%. Para este estudo, consideramos um meio-termo com um percentual de 0,1%.

3.3.10. Escalonamento e controle de potência

A fim de aumentar a eficiência em seu uso, a largura de banda de transmissão do canal de comunicação 5G é estabelecida por meio da agregação de recursos de espectro alocados para a estação móvel, e que são subdivididos em blocos de recurso (RB), de aproximadamente 180 KHz, alocados dinamicamente aos terminais acampados na estação rádio base. Esta alocação, segundo Dahlman et al (51) é feita através de um processo chamado de escalonamento de recursos (*schedulling*), feito pelo sistema de gerenciamento da rede de acesso radio 5G. Os terminais IMT utilizam então um mecanismo de controle de potência que prevê que o terminal não precise transmitir com potência máxima o tempo todo, e apenas aumentá-la caso seja necessário compensar eventuais perdas de acoplamento no percurso. Com base no nível de sinal que recebe do bloco de recurso, o terminal identifica a necessidade de acionar o controle de potência. Neste sentido, o agendamento e o controle de potência de *uplink* são funcionalidades intimamente ligadas.

Durante a simulação, a cada iteração a mesma quantidade de enlaces é agendada e distribuída. Assim, após a aplicação de uma banda de guarda, a banda resultante disponível para o sistema IMT é dividida igualmente entre os terminais de usuário de cada célula. Ou seja, cada terminal do usuário na mesma célula recebe a mesma quantidade de blocos de recurso. Desta forma, a quantidade de bloco de recursos por Estação Rádio Base (Nrb, ERB), conforme definições em Dahlman et al (51) pode ser dada por:

$$N_{rb,ERB} = \left\lfloor \frac{(1-r_g)B_{IMT}}{B_{rb}} \right\rfloor \quad (26)$$

Em que:

r_g é a proporção da banda disponível que é utilizada como banda de guarda;

B_{IMT} é a banda total alocada ao sistema IMT;

B_{rb} é a banda de cada bloco de recurso;

$\lfloor \cdot \rfloor$ é a função piso, que arredonda o termo para a sua parte inteira.

O cálculo da quantidade de blocos de recurso por terminal do usuário pode ser dado por:

$$N_{rb,Terminal\ Usuário} = \left\lfloor \frac{N_{rb,ERB}}{N_{UE,cell}} \right\rfloor \quad (27)$$

Que é a parte inteira da razão entre o número de blocos de recurso por Estação Rádio Base ($N_{rb,ERB}$) e o número de terminais do usuário por célula ($N_{Terminal\ Usuário,celula}$).

De acordo com Recomendação ITU-R M.2101 (2), o terminal do usuário ajustará constantemente sua própria potência de transmissão dentro da banda de modo a manter uma qualidade de *link* aceitável durante a transmissão de *uplink*. Este processo é denominado controle de potência. Esse comportamento também afeta o nível de emissão indesejada na banda adjacente do terminal do usuário.

As Estações Rádio Base transmitem sempre em potência máxima, enquanto os terminais do usuário transmitem com potência conforme a fórmula descrita por Dahlman et al (51) e no documento do 3GPP TR 37.840 (25) abaixo.

$$P_{PUSCH}(i) = \min(P_{CMAX}, 10 \log_{10}(M_{PUSCH}(i)) + P_{O_PUSCH}(j) + \alpha(j) \cdot CL) \quad (28)$$

Onde:

P_{PUSCH} é a potência transmitida do terminal em dBm

P_{CMAX} Potência máxima de transmissão em dBm

M_{PUSCH} Número de RBs alocados

P_{0_PUSCH} potência por RB usado valor alvo em dBm

α fator de balanceamento para terminais do usuário com canal ruim e terminais do usuário com canal bom

CL Perda de acoplamento em dB para o terminal do usuário de sua ERB de serviço.

3.3.11. Indicadores de desempenho

O último passo das interações da simulação é o cálculo dos indicadores de desempenho do sistema. Um dos principais indicadores é a relação sinal ruído, ou *Signal to Noise Ratio* (SNR), que utiliza o conceito de potência de ruído, conforme definição de Balanis (15):

$$SNR = \frac{S}{P_N} = \frac{P_{rx}}{kTBF} \quad (29)$$

Em que k é a constante de Boltzmann ($1,39 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura de ruído do receptor, B é a largura de banda de operação (Hz) e F é a figura de ruído do receptor. Sendo que $P_N = kTBF$ representa a potência do ruído, $S = P_{rx}$ representa a potência do sinal recebido e pode ser calculada em dBm, como:

$$P_{rx} = P_{tx} - CL \quad (30)$$

Em que P_{tx} é a potência do sinal transmitido e CL é a perda de acoplamento entre as estações.

Em uma rede sem fio há interferência Inter células quando estações de células próximas utilizam a mesma frequência. Essa interferência degrada o sinal recebido e reduz o nível desejado e, portanto, ela é levada em consideração ao se levantar o desempenho da rede. Assim, relação sinal ruído interferência pode ser dada por:

$$SINR = \frac{P_{rx}}{N + I} \quad (31)$$

No qual I é a interferência total das estações que estão operando na mesma banda.

Tendo sido calculado o SINR, pode se obter a eficiência espectral de uma transmissão por:

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{para } SINR < SINR_{MIN} \\ \beta \cdot S(SINR) & \text{para } SINR_{MIN} \leq SINR < SINR_{MAX} \\ \beta \cdot S(SINR_{MAX}) & \text{para } SINR \geq SINR_{MAX} \end{cases} \quad (32)$$

Na qual $S(\cdot)$ representa a capacidade de Shannon ($S(SINR) = \log_2(1 + SINR)$); β representa um fator de atenuação que modela a incapacidade do sistema de chegar ao limite de Shannon, $SINR_{MIN}$ e $SINR_{MAX}$ são respectivamente os valores de SINR mínimo, abaixo do qual não há comunicação e máximo, acima do qual a vazão de dados não pode mais aumentar. Quando multiplicada pela banda de transmissão, a eficiência espectral resulta na vazão de dados alcançada por uma estação. A vazão de dados das estações pode, então, ser somada para se determinar a vazão agregada em uma iteração de simulação.

Seguindo a mesma abordagem de estudos anteriores para esta faixa de frequência que seguem o documento 478 do *Task Group 5/1* da UIT (23), as simulações consideram os modelos de desempenho e interferência para sensoriamento remoto passivo de satélite da Recomendação ITU-R RS.2017 (31) bem como as perdas por *clutter* de acordo com a Recomendação ITU-R P.2108 (45). Para o modelo de canal para comunicação intra sistema IMT foi considerado o modelo UMi do 3GPP. Um dos componentes mais importantes para calcular a interferência inter sistemas é o ganho das antenas das Estações Rádio Base na direção dos sensores EESS (Passivos), que é diretamente afetada pelo diagrama de antena das estações IMT resultantes da conformação de feixes das antenas, conforme o documento 478 do *Task Group 5/1* da UIT (23). A interferência agregada das Estações Rádio Base IMT na direção dos sensores EESS (Passivos) é calculada de acordo com o documento 478 do *Task Group 5/1* da UIT (23), e o cálculo do impacto da interferência externa no sistema com interferência é feito conforme fórmula.

$$I_{\text{Externo}} = \sum_j \sum_k I_{\text{Externo}} \left(TX_{\text{ERB}_j}^{\text{Terminal Usuário}_k}, RX_{\text{vitima}} \right) \quad (33)$$

A interferência agregada é comparada a um determinado critério de proteção. Quando o valor da interferência excede o critério de proteção, a diferença representa o quanto deve ser adicionado nos limites de emissões indesejadas para evitar interferências prejudiciais.

4. ESTUDOS

A recomendação ITU-R M.2101 (2) fornece a metodologia para modelagem de redes IMT para uso em estudos de compartilhamento e compatibilidade entre IMT e outros sistemas e guiou todos os estudos da União Internacional de Telecomunicações.

Uma análise posterior na UIT sugeriu que o padrão da antena para bandas de frequência adjacentes pode ser melhor modelado com alguns ajustes no diagrama de radiação do Sistema de Antena Avançado (AAS).

Neste Capítulo são apresentados os estudos em andamento na UIT e que foram premissas para as simulações realizadas neste estudo.

4.1. Espaçamento do elemento (d / λ) dentro da linha horizontal e vertical

As antenas ativas permitem a conformação de feixes com um sinal de excitação em cada elemento radiante para formar o feixe. Considerando a geometria da matriz (posicionamento dos elementos dentro do painel), bem como as informações relacionadas ao sinal de excitação (fase e amplitude) que radia cada elemento, conforme apresentado nas seções 2.3.3 e 3.3.8 deste estudo, é possível descrever o *Array Factor* (AF) da antena como $AF(\varphi, \theta) = 10 \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} \omega_{n,m} \cdot v_{n,m} \right|^2 \right)$.

O *Array Factor* compreende os lobos principais e os lobos laterais. No caso de múltiplos extremos alcançados no *Array Factor*, os *grating lobes* se relacionam com os outros máximos além do lóbulo principal. Diferentes fatores explicam a ocorrência desses lóbulos laterais altos no conjunto de antenas:

- O espaçamento do elemento dentro das linhas horizontal e vertical.
- A fase do sinal de excitação em cada elemento radiante.

O espaçamento de elemento entre dipolos (d_y ao longo de uma linha e d_z ao longo de uma coluna de elementos) tem influência na fase φ de uma forma que se φ for além de $]2\pi, 2\pi[$, os valores máximos de (AF) podem ser superdimensionados e se repetirem na região visível. Isso pode dar origem a *grating lobes* em direções diferentes da desejada.

Sendo que a expressão (não normalizada) do Fator de Matriz (AF) de uma antena plana (retangular) localizada no plano yz conforme Balanis em *Antenna Theory* (15) e *Introduction to smart antennas* (29):

$$AF_n(\varphi, \theta) = \left\{ \frac{\text{sen}\left(\frac{M}{2}\psi_z\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_z}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{\text{sen}\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (34)$$

Onde:

$$\psi_z = kd_z \cos\theta + \beta_z \text{ e } \psi_y = kd_y \text{sen}\theta \text{sen}\varphi + \beta_y \quad (35)$$

Sendo que β_y , β_z são, respectivamente, a diferença na excitação de fase entre os elementos na linha e na coluna de dipolos.

Considerando seus valores máximos, pode-se notar que $\frac{\text{sen}(nx)}{\text{sen}(x)}$ atinge seus extremos em $x = p\pi, \forall p \in \mathbb{Z}$.

Dependendo da paridade de n, este extremo é mínimo (por exemplo, quando n é ímpar para $x = (2p + 1)\pi$) ou máximo (por exemplo, quando n é ímpar para $x = 2p\pi$). Considerando que $|AF|$ (como isso contribui para o componente de ganho da antena, estritamente positivo na escala linear) leva a atingir o máximo em: $x = p\pi, \forall p \in \mathbb{Z}$.

Pode-se concluir que $AF_n(\varphi, \theta)$ é máximo para $\psi_z = 2m\pi, \psi_y = 2n\pi, \forall (m, n) \in \mathbb{Z}^2$, desde que o denominador de AF seja $\frac{\psi_z}{2}$ e não ψ_z .

Sendo que o valor máximo principal acontece com $m = n = 0$.

Assim, para que o feixe principal de cada componente (matrizes vertical e horizontal) do AF seja orientado para a mesma direção (φ_0, θ_0) (correspondendo ao caso $m = n = 0$), as seguintes expressões devem ser atendidas:

$$\psi_z = 0 \Leftrightarrow \beta_z = -kd_z \cos\theta_0 \text{ e } \psi_y = 0 \Leftrightarrow \beta_y = -kd_y \text{sen}\theta_0 \text{sen}\varphi_0. \quad (36)$$

A equação (35) então fica:

$$\psi_z = kd_z(\cos\theta - \cos\theta_0) \text{ e } \psi_y = kd_y(\text{sen}\theta \text{sen}\varphi - \text{sen}\theta_0 \text{sen}\varphi_0) \quad (37)$$

A fim de evitar outros máximos além do máximo principal, a condição com $m, n \neq 0$ deve ser evitada e deve ser ocorrer com:

$$-2\pi < \psi_z < 2\pi \text{ e } -2\pi < \psi_y < 2\pi$$

$$\text{Ou seja, } -2\pi < kd_z(\cos\theta - \cos\theta_0) < 2\pi \text{ e } -2\pi < kd_y(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0) < 2\pi$$

$$-2\pi < \frac{2\pi}{\lambda} d_z(\cos\theta - \cos\theta_0) < 2\pi \text{ e } -2\pi < \frac{2\pi}{\lambda} d_y(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0) < 2\pi$$

$$\text{Ou seja : } -1 < \frac{d_z}{\lambda}(\cos\theta - \cos\theta_0) < 1 \text{ e } -1 < \frac{d_y}{\lambda}(\sin\theta\sin\varphi - \sin\theta_0\sin\varphi_0) < 1$$

Desde que

$$-1 < \cos\theta < 1, -1 < \frac{d_z}{\lambda}(-1 - \cos\theta_0) < \frac{d_z}{\lambda}(\cos\theta - \cos\theta_0) < \frac{d_z}{\lambda}(1 - \cos\theta_0) < 1 \quad (38)$$

$$\text{e } -1 < \sin\theta, \sin\varphi < 1, -1 < \frac{d_y}{\lambda}(-1 - \sin\theta_0\sin\varphi_0) < \frac{d_y}{\lambda}(1 - \sin\theta_0\sin\varphi_0) < 1 \quad (39)$$

$$\text{As equações (38) e (39) levam a: } \frac{d_z}{\lambda} < \min\left(\frac{1}{1-\cos\theta_0}, \frac{1}{1+\cos\theta_0}\right) \text{ e } \frac{d_y}{\lambda} < \min\left(\frac{1}{1-\sin\theta_0\sin\varphi_0}, \frac{1}{1+\sin\theta_0\sin\varphi_0}\right). \quad (40)$$

Se a condição da equação (40) for atendida para um determinado direcionamento de feixe (φ_0, θ_0) em uma matriz plana retangular (com elementos uniformemente separados em linhas horizontais e verticais), *grating lobes* podem ser evitados na expressão AF. Isso significa que uma condição para reduzir o nível dos lóbulos laterais muito abaixo do nível do lóbulo principal do padrão da antena seria garantir que o espaçamento do elemento seja suficientemente pequeno à frente do comprimento de onda, observando que o ganho da antena de elemento único na direção do lóbulo principal também contribui para reduzir o nível dos lóbulos laterais.

Assim, para situações de banda de frequência adjacentes, a Recomendação ITU-R M.2101 na seção 5 (2) afirma que "em uma situação de banda de frequência adjacente com IMT

como sistema interferente, o padrão de antena para a emissão indesejada pode ser assumido como tendo um diagrama de radiação antena semelhante a um único elemento de antena.”

Uma antena pode ser otimizada para uma banda de frequência operacional e seu diagrama de radiação de antena começará a distorcer quando se afastar da banda de frequência pretendida; esta distorção pode permanecer limitada em frequências adjacentes próximas.

Nesse sentido, o diagrama de radiação da antena pode permanecer em forma de feixe até certo ponto na banda de frequência adjacente.

Assim, no Anexo 1 ao Relatório do Chairman do Grupo de Trabalho 5/1 (23) foi definido que para os casos em que um padrão formado por feixe é usado em estudos, um ajuste adequado para o elemento dependente da frequência (d / λ) na equação do padrão composto deve ser feito utilizando $d / \lambda = 0,46$ em vez de 0,5.

A União Internacional de Telecomunicações está trabalhando em um documento sobre medições e modelagem matemática de Sistemas de Antenas Avançados em sistemas IMT-2020 e como ainda não estavam comercialmente disponíveis antenas, as discussões sobre espaçamento de elementos de antenas foram feitas com ferramentas de simulação eletromagnética. A simulação da Figura 31 abaixo foi feita com o software FEKO que é uma ferramenta de simulação que permite o uso de métodos numéricos para a solução das equações de Maxwell, de modo a modelar antenas 3D. A geometria dos modelos usados na simulação com o software FEKO estão apresentados no Anexo II a este trabalho.

Para os sistemas radiantes da Estação Rádio Base foram modelados painéis de antenas AAS com 8x8 elementos (2) com dipolo polar duplo -45° e $+45^\circ$ (52). O modelo da antena foi otimizado na frequência central de 26 GHz e a comparação do padrão de radiação na banda adjacente é feita na frequência de 23,6 GHz utilizando o Método dos Momentos, do inglês *Method of Moments* (MoM).

Nessa figura as curvas em azul representam a simulação no FEKO do diagrama de radiação de uma rede 8x8 com feixe principal apontando perpendicularmente ao plano da matriz, com uma distância entre os elementos $d / \lambda = 0,5$ na frequência adjacente de 23,8 GHz e as curvas em vermelho foram obtidas com os mesmos parâmetros seguindo a recomendação ITU-R M2101 (2).

FIGURA 31a

FIGURE 31b

Diagrama de radiação vertical antes do ajuste d/λ .

Efeito no diagrama de radiação vertical depois do ajuste d/λ .

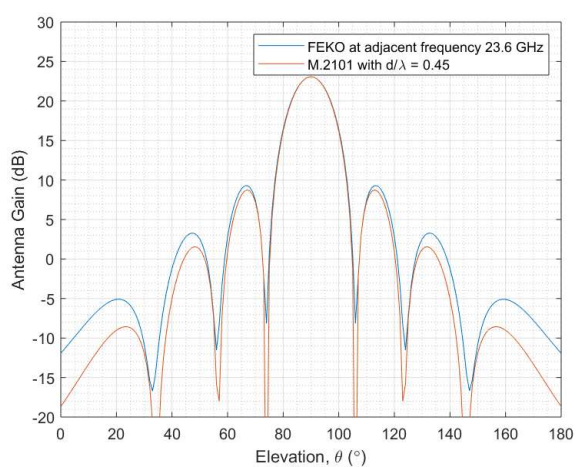
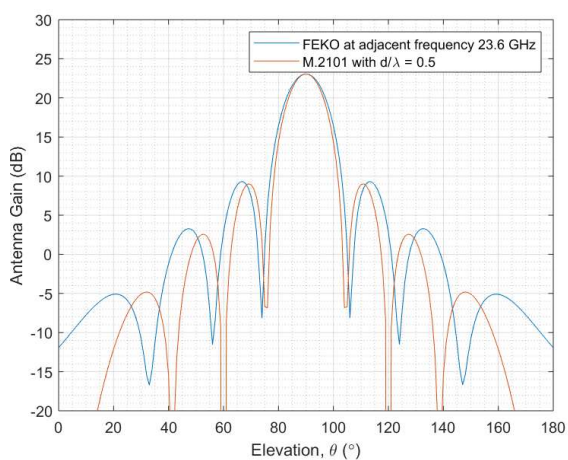
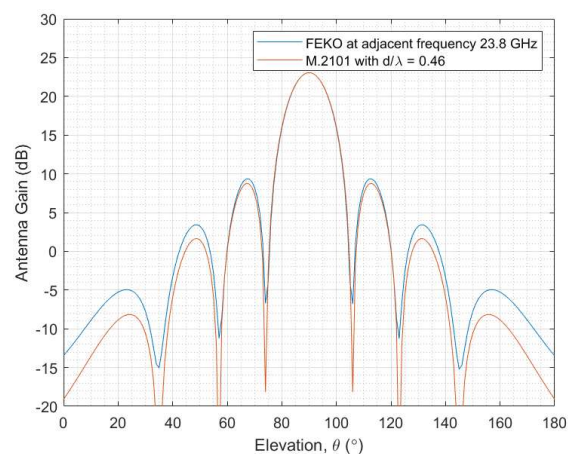
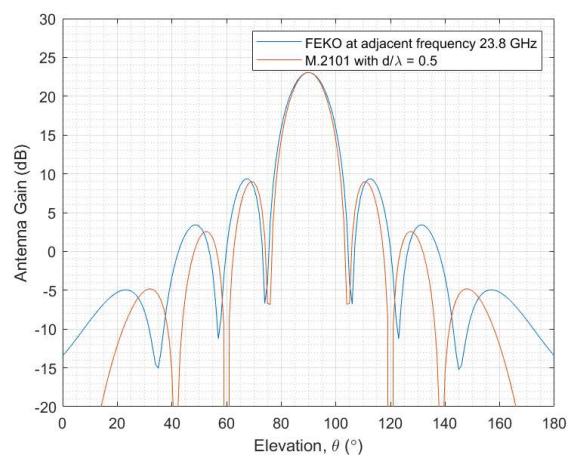


Figura 31 - Simulação de *beamforming* antes e depois do ajuste d/λ

Fonte: Document 5D/545-E da UIT-R (52)

A mudança no d/λ muda a posição dos lóbulos laterais do padrão e isso é consistente com a teoria básica da antena, onde o fator de espaçamento efetivo do elemento é diferente quando consideramos uma frequência diferente. Isso efetivamente estica o diagrama de radiação da antena e muda a localização dos lóbulos laterais.

4.2. Modificação simples para o diagrama de radiação de elemento único

Conforme já detalhado neste estudo nas seções 2.3.3 e 3.3.8,, o diagrama de radiação horizontal é dado pela seguinte equação $A_{E,H}(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ dB e o diagrama de radiação vertical é dado pela seguinte equação $A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta-90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_V \right]$ dB.

O subgrupo de estudos de compartilhamento do WP5D está elaborando um documento sobre *Advanced Antenna Systems* e está sendo verificado que um ajuste simples para o fator de multiplicação (denotado como k nas equações abaixo) daria uma correspondência mais próxima aos dados de simulação do software FEKO.

Assim, o padrão de radiação horizontal ficaria:

$$A_{E,H}(\varphi) = -\min \left[k \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \text{ dB} \quad (41)$$

E o padrão de radiação vertical ficaria:

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[k \left(\frac{\theta-90}{\theta_{3d}} \right)^2, SLA_V \right] \text{ dB} \quad (42)$$

As Figuras 32 A e 32 B abaixo mostram o padrão geral da antena com uma mudança no d / λ e o fator de multiplicação $k = 8$.

FIGURA 32a

Diagrama de radiação vertical com $d/\lambda = 0.46$ e $k = 8$

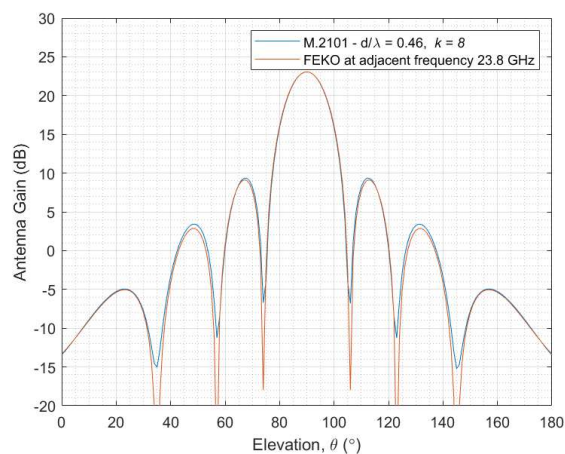


FIGURA 32b

Diagrama de radiação horizontal com $d/\lambda = 0.46$ e $k = 8$

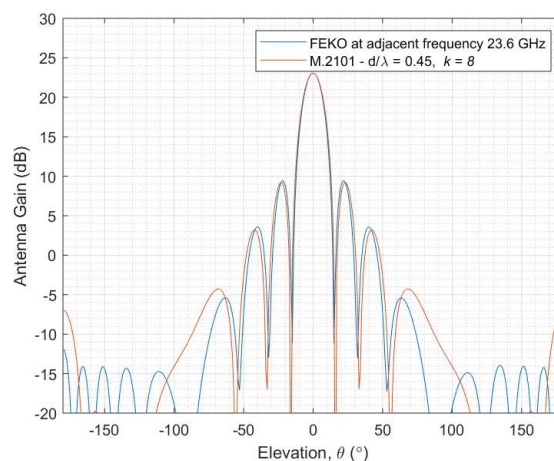
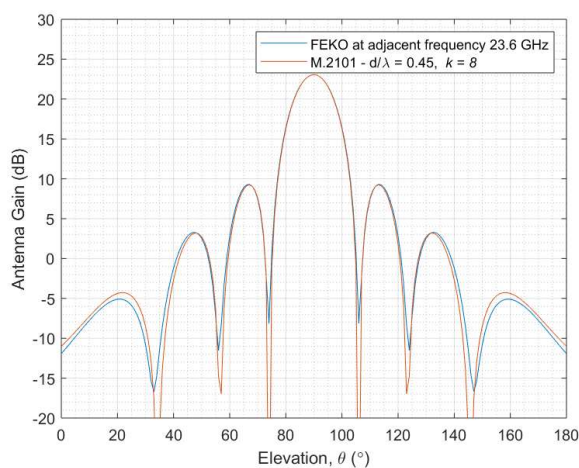
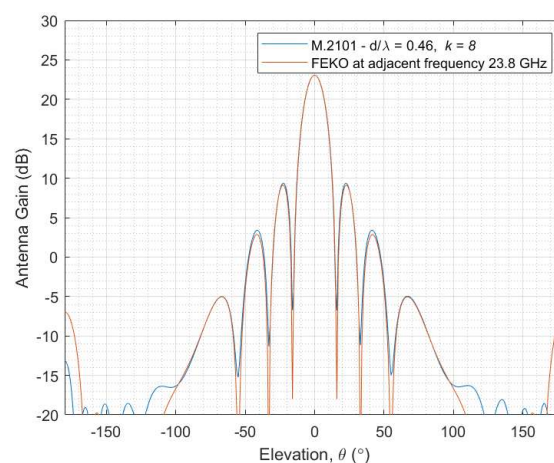


Figura 32 - Simulação de *beamforming* antes e depois do ajuste do fator k

Fonte: Document 5D/545-E da UIT-R (52)

A Figura 32a mostra uma combinação muito boa no padrão vertical, enquanto a Figura 32b ilustra uma combinação muito boa nos primeiros dois lóbulos laterais no painel frontal da antena (isto é, $\pm 90^\circ$), mas não tão boa além disso.

Comparação entre diferentes modelos de antenas IMT

Para situações de banda de frequência adjacentes, a Recomendação ITU-R M.2101 (seção 5) (2) afirma que "em uma situação de banda de frequência adjacente com IMT como

sistema interferente, o diagrama de radiação da antena para a emissão indesejada pode ser assumido como tendo um diagrama de radiação semelhante a um único elemento de antena.”

As Estações Rádio Base foram configuradas com *downtilt* de 10° e pode se observar que seu ganho chega a 5dBi. O ganho do terminal é um pouco maior porque eles podem estar apontando para qualquer lado.

A Figura 33 apresenta, para os ganhos de antenas IMT em relação ao sensor F3 da EESS (Passiva) considerando vários valores de espaçamento d/λ . As Estações Rádio Base foram configuradas com *downtilt* de 10° e as CDFs de cada configuração de antena foram simuladas na ferramenta SHARC.

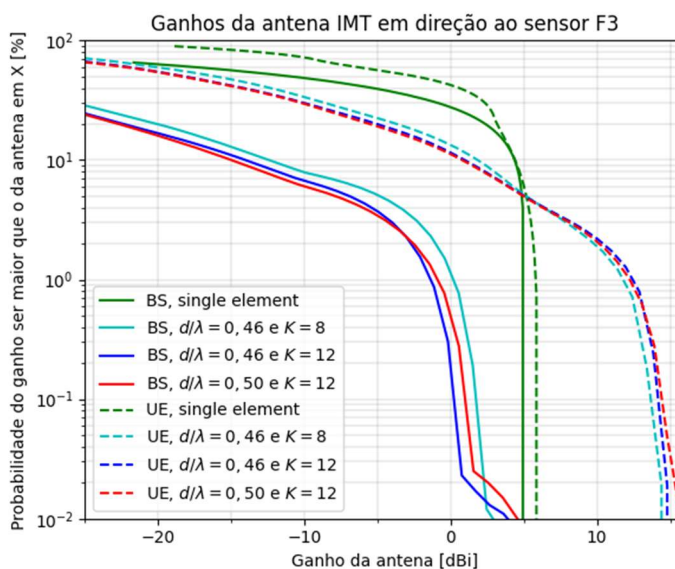


Figura 33 - Ganhos de antena IMT em relação ao sensor F3

Nesta simulação as Estações Rádio Base estão configuradas com *beamforming* com matriz de 8×8 antenas e as antenas do terminal estão configuradas com matriz de 4×4 antenas. Teoricamente o ganho das antenas da Estação Rádio Base deveria ser maior. Mas como os sensores da EESS (Passiva) estão a aproximadamente 828 km de altitude e as antenas das Estações Rádio Base estão com o lóbulo principal apontadas para baixo e as antenas do terminal estão apontando para cima pode se observar que o ganho do terminal na simulação é maior que o da Estação Rádio Base, porque praticamente somente o lóbulo traseiro, estaria apontando para o sensor.

Para a probabilidade de 0,1%, o ganho da antena em *beamforming* com espaçamento $d/\lambda = 0,46$ e $k=12$ do sinal para o sensor proveniente dos terminais do usuário é de 13,96 dB maior que o ganho proveniente das Estações Rádio Base. O ganho médio considerando os espaçamentos simulados foi de 13,07 dB. Assim, nas simulações feitas na ferramenta SHARC os terminais do usuário podem estar gerando mais interferência para o sensor da EESS (Passiva).

Na figura 34, comparando a curva para a antena em *beamforming* da Estação Rádio Base com espaçamento $d/\lambda = 0,46$ e $k = 8$ com a curva para $d/\lambda = 0,46$ e $k = 12$, o ganho com fator de multiplicação K igual a 8 é maior do que com fator igual a 12 pois a atenuação que ocorre nos *side lobes* indica que a interferência gerada para o sensor da EESS (Passiva) é maior do que se imaginava. Essa diferença entre as simulações com *beamforming* dos terminais não se observa porque cada Estação Rádio Base tem vários feixes de radiação provenientes dos terminais conectados a ele e o sinal pode vir por vários caminhos, o que tende a convergir para uma média. Ademais, apenas o sinal do lóbulo principal dos terminais está apontado para o sensor.

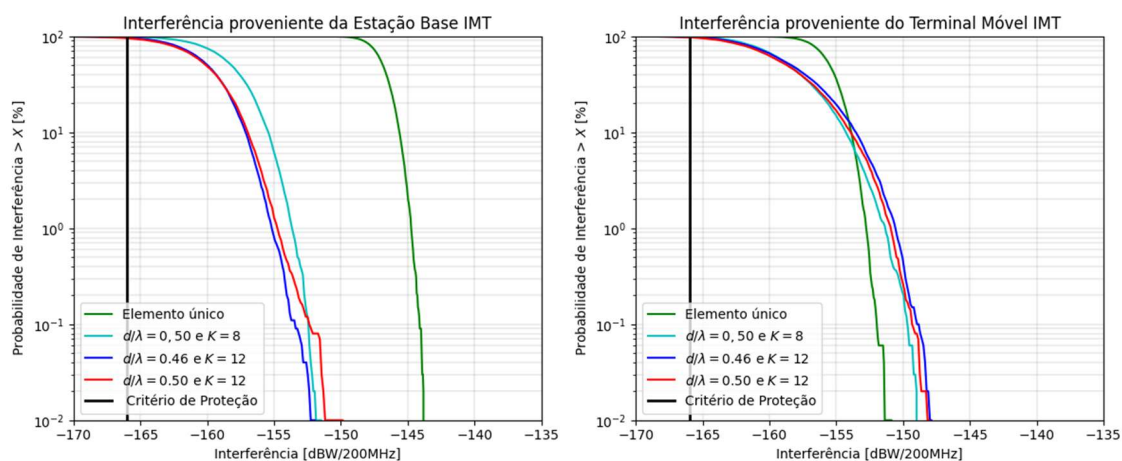


Figura 34 - Interferência dos sistemas IMT ao sensor F3

A Figura 34 mostra a probabilidade de interferência dos sistemas IMT no EESS (Passivo) comparando a configuração do padrão de elemento único com várias configurações de espaçamento de antenas. Este gráfico ratifica as simulações considerando os ganhos das antenas da Figura 33. Da Figura 34 pode se observar também que na simulação efetuada que a interferência proveniente do terminal é maior que a proveniente da Estação Rádio Base.

Também pode se observar que a adoção do padrão de Elemento Único subestima a interferência proveniente do terminal para o sensor EESS (Passivo) em relação a interferência proveniente das simulações com *beamforming*.

Pode se observar que do ponto de vista da interferência do terminal do usuário para o sensor F3 o diagrama de radiação de antena de Elemento Único é o que gera menos interferência.

Os estudos foram realizados no Sensor F3 que foi considerado pelo TG 5/1 como o mais restritivo. Como pode se observar do gráfico abaixo, os resultados obtidos de outros sensores tiveram resultados similares (F2 e F8) ou menos restritivos.

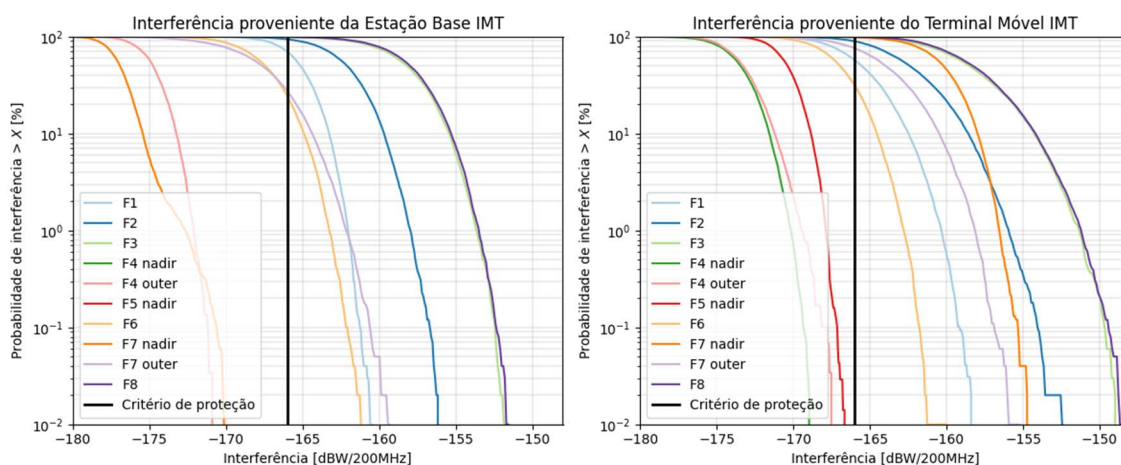


Figura 35 - Interferência dos sistemas IMT no EESS (Passivo) para cada sensor

A recomendação ITU-R RS.2017 (31) fornece os critérios de proteção para sistemas EESS (Passivos) na banda de 23,6 a 24 GHz. A largura de banda de referência é 200 MHz, o nível máximo de interferência é -166 dBW, a porcentagem de área ou tempo de nível de interferência permitido que pode ser excedido é 0,01%.

Tabela 18 - Margens para critérios de proteção passiva EESS (-166 dBW / 200 MHz em 0,01% do tempo)

	F1	F2	F3	F4 (nadir)	F4 (externo)	F5 (nadir)	F5 (externo)	F6	F7 (nadir)	F7 (externo)	F8
Margem ERB	-5,5	-10,0	-14,8	17,7	5,0	16,2		-4,8	4,1	-6,7	-14,3
Margem Terminal Móvel	-8,0	-13,6	-17,3	2,9	1,4	0,6		-4,9	-11,3	-10,2	-17,8

Tabela 19 - Limites de emissões indesejadas para atender aos critérios de proteção EESS (Passiva)
em dBW / 200MHz

	F1	F2	F3	F4 (nadir)	F4 (externo)	F5 (nadir)	F5 (externo)	F6	F7 (nadir)	F7 (externo)	F8
Margem ERB	-29,3	-33,8	-38,6	-23,8	-23,8	-23,8	-23,8	-28,6	-23,8	-30,5	-38,1
Margem Terminal Móvel	-28,0	-33,6	-37,3	-20,0	-20,0	-20,0	-24,9	-24,9	-31,3	-30,2	-37,8

De acordo com a Recomendação ITU-R RS.2017 (31), a disponibilidade de dados é a porcentagem de área ou tempo para o qual os dados precisos estão disponíveis para uma área de medição de sensor especificada ou tempo de medição de sensor. Para um nível de 0,01% de uma área de 2.000.000 km² significa que, no máximo, uma superfície de 200 km² poderia aceitar exceder o nível de interferência. Já um nível de 0,1% significa que 2000 km² poderia aceitar exceder o nível de interferência.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A Recomendação M.2101 (2) estabeleceu que a caracterização do diagrama de radiação em faixas adjacentes para os estudos seria feita pelo diagrama de radiação do elemento único ou *single element*. Todavia no decorrer das discussões se demonstrou que nas faixas imediatamente adjacentes a conformação de feixes continua tendo um efeito significativo, então nas discussões para a CMR-19 terminou por sendo feitas avaliações considerando o elemento único e com conformação de feixes. Neste estudo temos os dois cenários sendo que o cenário que mais se aproxima do real é com conformação de feixes.

Conforme detalhado no Capítulo 2, ao direcionar um feixe com azimute $\varphi_0 = 0^\circ$ e uma elevação dada θ_0 , qualquer espaçamento de elemento d maior ou igual a $\lambda/(1 \pm \cos\theta_0)$ começará a gerar lóbulos laterais com intensidades significativas conhecidos como *grating lobes*. As Figuras 36 (a) e (b) apresentam o padrão de radiação horizontal e vertical das antenas das Estações Rádio Base IMT-2020, respectivamente, simuladas na frequência central de 24,35 GHz, comparando diferentes espaçamentos de antenas. As curvas em azul mostram o padrão de radiação para uma antena com espaçamentos horizontais e verticais iguais, $d / \lambda = 0,5$, enquanto as curvas em laranja apresentam o padrão de radiação para espaçamento horizontal $d / \lambda_h = 0,6$ e espaçamento vertical $d / \lambda_v = 0,9$. Ambos os diagramas são apontados para um ângulo de elevação, $\theta = 105^\circ$ e um ângulo de azimute $\varphi = 0^\circ$. Tendo em vista que a elevação de 0° aponta para o zênite, o feixe estaria a 15° abaixo do *boresight*. Como pode ser visto, este cenário apresenta um exemplo da formação de um *grating lobe* para um ângulo de elevação de aproximadamente 35° , ou seja, em uma direção que tem um impacto significativo na geração de interferência para os sensores EESS (Passivos).

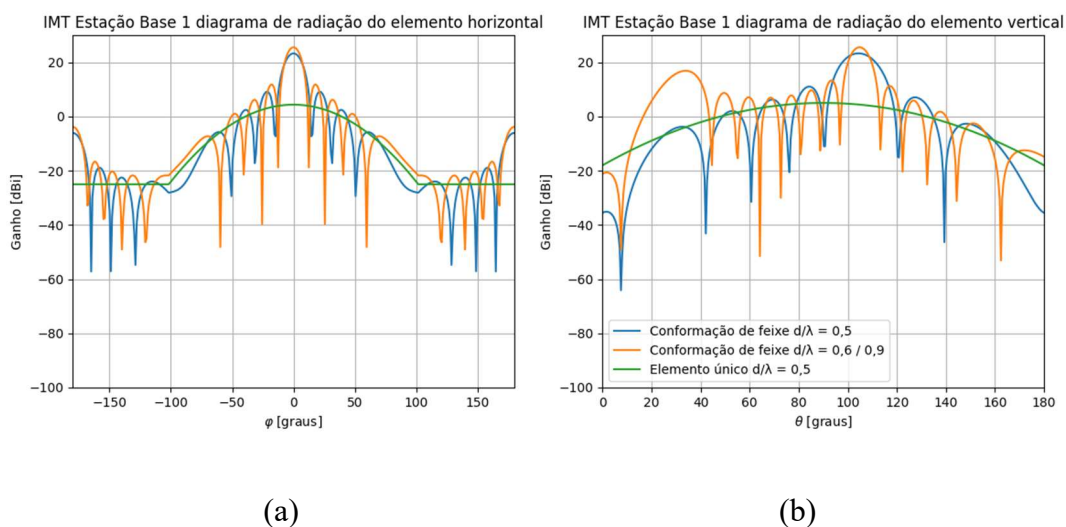


Figura 36 - Diagrama de radiação de antena da Estação Base IMT 2020; (a) Horizontal; (b) Vertical - Para um ângulo de elevação de *grating lobe* de 30°

Além disso, a Figura 37 apresenta a interferência de emissão indesejada agregada gerada pela Estação Rádio Base 5G para os sensores passivos F3 das EESS considerando diversos espaçamentos de elementos de antena. São apresentadas apenas as curvas da Estação Rádio Base, uma vez que apresentam níveis de interferência superiores às curvas do terminal do usuário, considerando os efeitos dos *grating lobes*. Tendo em vista que os terminais do usuário já estão apontando na direção dos sensores da EESS (Passiva), não foram verificadas interferências significativas alterando os espaçamentos de d/λ .

No percentil 1%, para um espaçamento de antena de 0,5, indicado pelo ponto (B), temos 11,2 dB acima da linha de base de referência de -166 dBW / 200 MHz indicado pelo ponto (A) e de 13,6 considerando um percentil de 0,1% em B', que é menos crítico do que o nível de interferência para uma antena de elemento único que é de 21.2 dB, indicado pelo ponto (C). Este nível de emissões indesejadas está acima do limite de referência de -20 dBW / 200 MHz. No entanto, para uma antena em conformação de feixe com espaçamento vertical de 0,9, temos um nível de interferência mais crítico de 22,2 dB para o percentil de 1%, indicado pelo ponto (D). Portanto, nas simulações foi verificado que o potencial de interferência no EESS (passivo) aumenta para antenas em conformação de feixe que implementam distância de separação de elemento superior a $d/\lambda = 0,5$.

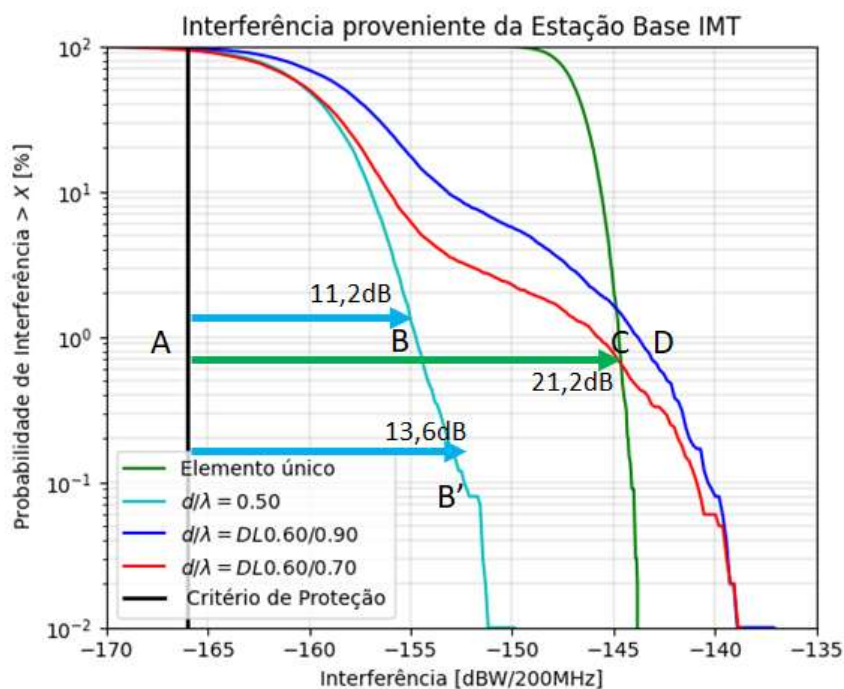


Figura 37 - Interferência agregada de emissões indesejadas da ERB IMT no sensor F3 na faixa de frequência 23.8-24 GHz

Durante as discussões da CMR-19, havia países que defendiam um limite de emissões em -42 dBW/200MHz considerando um valor de referência de -20 dBW/200MHz. Se considerarmos os resultados de uma antena de elemento único, mostrado pelo ponto (C), essa premissa estaria coerente. Mas essas simulações mostram que uma implementação com antenas em conformação de feixes com espaçamento de 0,5 é mais realista e está de acordo com a decisão da Conferência Mundial de Radiocomunicações de restringir a emissão no início da implementação em -33 dBW/200 MHz. Já um cenário com espaçamento vertical de 0,9 deve ser evitado porque até ultrapassaria as emissões de uma antena de elemento único.

Tendo em vista o constante crescimento das redes móveis celulares, foi feita uma análise de sensibilidade para verificar o comportamento da rede conforme elas forem ficando mais densas.

Na teoria sobre probabilidade, linearidade da expectativa é a propriedade de que o valor esperado da soma das variáveis aleatórias é igual à soma de seus valores esperados individuais conforme (27), (53) e (54).

Assim, a tendência em primeiro momento é considerar um crescimento linear em que se a densidade das redes aumentasse em 10 vezes a interferência também aumentaria em 10 vezes, mas isso só seria válido para a média. Pode se observar na Figura 38 que saindo da média e considerando percentis mais altos, esse crescimento não é linear.

Considerando um percentil de alta ordem como 0,1%, ocorre um aumento na interferência de 5,53 dB de uma rede 10 vezes maior, indicado pelo ponto (B) em relação a uma rede de referência, indicado pelo ponto (A). Ou seja, na prática teríamos uma interferência 4 vezes menor do que o esperado para um crescimento linear.

Esse crescimento linear só seria alcançado se todos os *hotspots* mantivessem o mesmo tráfego nos terminais do usuário. Essa premissa não é razoável à medida que o número de Estações Rádio Base aumenta, pois alguns dos *hotspots* podem nem mesmo ter um usuário para atender com a diminuição de sua área de atendimento, mesmo com o aumento na densidade de terminais do usuário.

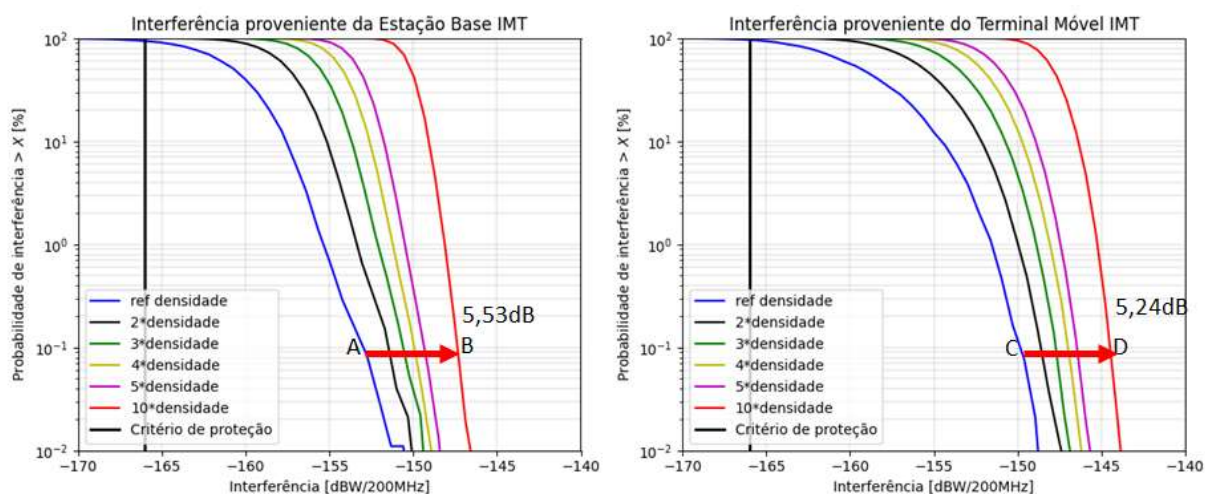


Figura 38 - Aumento da densidade na rede

Não se espera que a densidade de *hotspots* creça na proporção de 10 vezes mais que a rede de referência utilizada neste estudo, mas as simulações mostraram que mesmo que a densidade de *hotspots* aumente, a interferência agregada nos sistemas espaciais não crescerá na mesma proporção.

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este estudo apresentou simulações com as linhas de base que apoiaram as decisões da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 em relação aos limites de emissão indesejados para proteger EESS (Passivo) na faixa de 23,6 a 24 GHz. Também apresentou uma análise de sensibilidade, com espaçamento dos elementos AAS de $d / \lambda = 0,5$, que também foi levada em consideração pela CMR-19.

No Capítulo 1 apresentou-se as preocupações da comunidade meteorológica mundial e as premissas assumidas pela União Internacional de Telecomunicações para garantir a proteção do EESS (Passivo) para emissões indesejadas do IMT-2020. No Capítulo 2 fez-se a fundamentação teórica com revisão bibliográfica sobre elementos de sistemas de comunicação, em especial dos sistemas 5G e dos sistemas EESS (Passivos), destacando os aspectos relacionados a rede de acesso rádio. No Capítulo 3 foi apresentada a ferramenta de simulação SHARC e foram explicadas a metodologia de simulação e a modelagem das estações dos sistemas analisados. No Capítulo 4 foi feita uma revisão comparativa de estudos de convivência envolvendo proteção dos serviços EESS (Passivo). O Capítulo 5 apresentou os resultados das simulações, ressaltando os parâmetros de entrada avaliados e os resultados.

6.1. Considerações Gerais

Há estudos (10) e (11) alertando que os critérios de proteção para os sensores passivos EESS de emissões indesejáveis dos Sistemas IMT-2020 não são atendidos na maioria dos cenários, e estudos adicionais são necessários para proteger esses sensores. Este trabalho foi pioneiro na medida em que até o momento não foram verificados estudos relacionados a análise de sensibilidade de parâmetros como alteração na densidade de estações e alteração no espaçamento dos elementos das antenas na análise de interferência entre o IMT e o EESS (Passivo)

6.2. Análise de espaçamento de elementos de antenas

No Capítulo 2 deste trabalho foi apresentada a importância dos Sistemas de Antenas Avançadas (AAS) na implementação dos Sistemas IMT-2020 em ondas milimétricas e do espaçamento dos elementos de uma antena AAS.

Para combater o desvanecimento, ou *fading* (15), é necessário o espaçamento entre elementos de pelo menos $\lambda/2$ para que os sinais recebidos de diferentes elementos de antena sejam quase independentes em um ambiente com muito espalhamento. Nesses casos, os arranjos de antenas proporcionam melhoria de desempenho por meio da diversidade espacial. Adicionalmente, à medida que a frequência aumenta a partir do espaçamento nominal de meia onda, o ganho aumenta até que o primeiro lóbulo da grade apareça (20). No entanto, para evitar lóbulos de grade, o espaçamento entre os elementos não deve exceder um determinado comprimento de onda.

Assim, apesar de o espaçamento entre elementos de $\lambda/2$ (meio comprimento de onda) ser o mais recomendado (15), podem ser encontrados cenários com um maior espaçamento entre os elementos (25). A contribuição original deste trabalho foi uma análise de sensibilidade com espaçamento de elementos de antenas AAS diferentes, com base em documentos do 3GPP, mostrando que a interferência pode aumentar para tais cenários, parcialmente devido a eventos de *grating lobes* que ocorrem na conformação de feixes para altos ângulos de elevação *theta*.

A contribuição deste trabalho foi um estudo pioneiro mostrando que poderão haver antenas com espaçamento entre os elementos (25) utilizadas comercialmente para a implementação das redes IMT-2020 com o potencial de gerar interferência nos Sistemas EESS (Passivos). Isso não significa que todas as estações terão antenas com esse espaçamento de elementos. Como solução, propõe-se a limitar o direcionamento dos feixes, ou *beamsteering*, ou seja, evitar que o lóbulo principal atinja *theta-tilts* elevados como formas de mitigar interferências em serviços espaciais e limitar a separação dos elementos da antena para evitar o aparecimento de *grating lobes*. O impacto será avaliado em trabalhos futuros.

6.3. Análise de alteração na densidade de estações

No Capítulo 3 deste trabalho foi discutido como o número de *hotspots* IMT-2020 dentro da área de cobertura do feixe dos sensores F3 do EESS (Passivo) são baseados na densidade

das Estações Rádio Base em áreas urbanas/suburbanas locais (26). Tendo em vista o constante crescimento das redes móveis celulares, foi realizada uma análise de sensibilidade para analisar o comportamento da rede conforme elas forem ficando mais densas.

As simulações confirmaram que a interferência agregada dos sistemas 5G no EESS (Passivo) aumenta linearmente somente na média e cresce de forma muito mais lenta em altos percentis. Assim, de acordo com as simulações, com o aumento da densidade dos *hotspots* podemos ter um aumento na interferência agregada das Estações IMT-2020 nos sensores do EESS (Passivo) até quatro vezes menor do que se considerarmos um crescimento linear.

A contribuição desses resultados é importante na análise de sensibilidade do impacto do aumento da densidade das redes IMT-2020 para que sejam definidos critérios de proteção realistas para os Sistemas EESS (Passivos) que não inviabilizem a implementação do IMT-2020.

6.4. Publicações e trabalhos futuros

Os resultados das simulações e as conclusões deste trabalho sobre o espaçamento entre elementos de uma antena AAS foram apresentadas no evento internacional IMOC 2021 realizada em Fortaleza, CE, sob o título “*Coexistence between IMT-2020 and EESS(Passive) in the 24 GHz Band*”.

Como trabalho futuro, está sendo trabalhado em um artigo para publicação contendo a análise de sensibilidade do comportamento da rede conforme elas forem ficando mais densas feita nesse estudo e sobre o impacto do direcionamento dos feixes, conhecido como *beamsteering*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Radio Regulations**, 2016. Disponível em <https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2020&media=electronic>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (2) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R M.2101. Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies**, 2017. Disponível em <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2101/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (3) BRASIL. Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997. **Institui a Lei Geral de Telecomunicações**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 135, p. 15081, 17 jul. 1997.
- (4) WITZE, A. **Glogal 5G Wireless – Deal Threatens Weather Forecasts**. Revista NATURE, v. 575, p. 577, 2019. Disponível em <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03609-x>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (5) VANNITHAMBY R.; SOON, A. C. K. **5G Verticals: Customizing Applications, Technologies and Deployment Techniques**. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons Ltd, 2020, p. 60, 31. ISBN: 978-1-11-951483-1.
- (6) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Task Group 5/1 Chairman’s Report - Report on the sixth meeting of Task Group 5/1, ITU-R Revision 2 to Document 5-1/478-E**, 2018. Disponível em: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0478/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (7) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R RS.2165. Identification of degradation due to interference and characterization of possible interference mitigation techniques for passive sensors operating in the Earth exploration satellite service (passive)**, 2009. Disponível em <https://www.itu.int/pub/R-REP-RS.2165>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (8) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Radio Regulations 2020, Resolution 750 (REV.WRC-19), “Compatibility between the Earth Exploration-Satellite Service (passive) and relevant active services”**. 2019. Disponível em https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0C/0A/R0C0A00000F00157PDFE.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (9) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R RS.1861. Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (passive) systems using allocations between 1.4 and 275 GHz**, 2010. Disponível em <https://www.itu.int/rec/R-REC-RS.1861/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (10) CHO Y.; KIM H. K.; NEKOVEE M.; JO H. S. **Coexistence of 5G With Satellite Services in the Millimeter-Wave Band**. in IEEE Access, vol. 8, p. 163618-163636, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022044.

- (11) CHEN J.; QIAN Z.; WANG T.; LI X. **Analysis on the protection distance for spectrum sharing between IMT-2020(5G) and EESS systems in 25.5 27 GHz band.** in Proc. IEEE 2nd Inf. Technol., Netw., Electron. Autom. Control Conf. (ITNEC), Chengdu, China, Dec. 2017, p. 970-975. ISBN: 978-1-5090-6414-4, DOI: 10.1109/ITNEC.2017.8284880.
- (12) HAYKIN, S., **Communication Systems.** 4th Edition. New York, NY. John Wiley & Sons, 2001, p. 20. ISBN 0-471-17869-1.
- (13) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Task Group 5/1 Doc. 478 - Attachment 2 to Annex 3 to Task Group 5/1 Chairman's Report - Sharing and compatibility of passive services in adjacent frequency bands and IMT operating in the 24.25-27.5 GHz frequency range.** 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0478/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (14) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,** 2015. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (15) BALANIS, C.A. **Antenna Theory.** Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2016. p. 938-936-312-455-986-98-351. ISBN: 978-1-118-642060-1.
- (16) PATTAN, B. **Robust Modulation Methods & Smart Antennas in Wireless Communications.** Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall PTR, 2000. ISBN: 978-0130220295.
- (17) BALANIS, C. A. **Modern Antenna Handbook.** Hoboken, NJ. John Wiley & Sons. 2008. Ch 11, p 532. ISBN: 978-0-470-03634-1.
- (18) STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. **Antenna Theory and Design,** 3rd Edition, New York, NY. John Wiley & Sons, 1998. p. 540-131-408. ISBN: 0-471-02590-9.
- (19) MONZINGO, R.; MILLER T. **Introduction to Adaptive Arrays.** Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, 1980. p. 21. ISBN: 978-0-471-05744-4.
- (20) HANSEN, R. C. **Phased array antennas.** Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, 2009. p. 3, ISBN 978-0-470-40102-6
- (21) BUTLER, J.; LOWE, R. **Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas,** *Electronic Design*, p. 170-173, April 12, 1961.
- (22) BLASS, J. **Multidirectional Antenna: a new approach to stacked beams,** IRE International Conference Record, Vol. 8, Part 1, 1960.
- (23) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Task Group 5/1 Doc. 478 - Annex 1 to Task Group 5/1 Chairman's Report System parameters and propagation models to be used in sharing and compatibility studies.** 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0478/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (24) 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), **TR 37.842 V13.3.0 (2019-12) - Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial**

- Radio Access (E-UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access (UTRA);** Radio Frequency (RF) requirement background for Active Antenna System (AAS) Base Station (BS) (Release 13), 2019. Disponível em <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2625>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (25) 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), **TR 37.840 V12.1.0 (2013-12) - Technical Specification Group Radio Access Network; Study of Radio Frequency (RF) and Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements for Active Antenna Array System (AAS) base station (Release 12)**, 2013. Disponível em <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2624>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (26) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Liaison statement to Task Group 5/1 - Spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz, International Telecommunication Union (ITU) Document 5-1/36-E**, 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0036/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (27) PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. **Probability, random variables and stochastic processes**. 4th ed, New York, NY. MacGraw-Hill, 2002, p. 221-90-249. ISBN: 0-07-366011-6 / 0-07-112256-7.
- (28) LANDAU, D. P.; BINDER, D. A. **A Guide do Monte Carlo Simulation in Statistical Physics**. 3rd ed, Cambridge, NY, Cambridge University Press, 2009 ISBN: 978-0-521-76848-1 / 978-0-511-65176-2.
- (29) BALANIS, C. A.; IOANNIDES, P. I. **Introduction to Smart Antennas**. San Rafael, CA. Morgan & Claypool Publishers, 2007. p. 128-61-108. ISBN: 978-1-598-29176-6.
- (30) ASPLUND, H. et al. **Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments**. London, UK. Academic Press, 2020, p. 547, 520, 61. ISBN: 978-0-12-820046-9.
- (31) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R RS.2017. Performance and interference criteria for satellite passive remote sensing**. Genebra, Suíça, 2012. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-RS.2017/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (32) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R SA.609-2 - Protection criteria for radiocommunication links for manned and unmanned near-Earth research satellites**, 2006. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-SA.609-2-200603-I/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (33) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R SA.1396 (04/1999) - Protection criteria for the space research service in the 37-38 GHz and 40-40.5 GHz bands**, 2006. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-SA.1396/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (34) SHARC Simulator. <https://github.com/SIMULATOR-WG/SHARC>.

- (35) SOUZA E.; LINHARES A.; QUEIROZ C.; VALLE L.; DIAS U.; BARRETO A. **An open source simulation tool for sharing and compatibility studies between 5G and other radiocommunication systems**. In: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC). (S.l.: s.n.), 2017. p. 1–5. ISBN: 978-1-5090-6241-6. DOI: 10.1109/IMOC.2017.8121171.
- (36) QUEIROZ, C. B. **Comunicações IMT-2020: Interferência e Compartilhamento de Frequência em Ondas Milimétricas**. 2019. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2019.
- (37) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **System Parameters and Propagation Models to be used in Sharing and Compatibility Studies, International Telecommunication Union (ITU) Document 5-1/92-E**, 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0092/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (38) COX, C. **An Introduction to 5G. The New Radio, 5G Network and Beyond**. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, 2021, p. 77. ISBN: 978-1-119-60269-9.
- (39) 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), **TR 38.901 V16.0.0 (2019-10) - Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16)**, 2019. Disponível em <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (40) 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), **3GPP TR 36.873 V12.7.0 (2017-12) - Technical Specification Group Radio Access Network; Study on 3D channel model for LTE (Release 12)**, 2017. Disponível em <https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.873/>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (41) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Report ITU-R M.2135-1 (12/2009). Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced**, 2019. Disponível em <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (42) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Liaison statement to Task Group 5/1 - WRC-19 agenda item 1.13, International Telecommunication Union (ITU) Document 5-1/29-E**, 2016. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0029/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (43) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Liaison statement to Task Group 5/1 - Guidance on the use of ITU-R P-Series Recommendations for interference prediction and sharing studies under WRC-19 agenda item 1.13, International Telecommunication Union (ITU) Document 5-1/38-E**, 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0038/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (44) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R P.452. Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz**, 2015. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.

- (45) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R P.2108-0. Prediction of clutter loss**. 2017. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (46) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R P.2109-1 (08/2019) - Prediction of building entry loss**, 2019. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2109/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (47) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Recommendation ITU-R P.619-4. Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth**, 2019. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.619/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (48) 3rd GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), **TR 38.900 V15.0.0 (2018-06) - Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz (Release 15)**, 2018. Disponível em <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2991>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (49) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **ITU-R Report ITU-R M.2412-0 (10/2017). Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020**, 2017. Disponível em <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2412-2017-PDF-E.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (50) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Recommendation ITU-R P.1411-10 (08/2019). Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz**. 2019. Disponível em <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1411/en>> Acesso em: 23 nov. 2021.
- (51) DAHLMAN, E.; PARKVALL S.; SKOLD, J. **5G NR The Next Generation Wireless Access Technology**. 2nd Ed, London, UK. Academic Press, 2021, p. 97-355-326. ISBN: 978-0-12-822320-8.
- (52) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **Chairman's Report 37th e-meeting of Working Party 5D - Meeting Report of Spectrum Aspects and WRC-23 Preparations, International Telecommunication Union (ITU) Document 5D/545**, 2021. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R19-WP5D-C-0545/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.
- (53) HSU, H. P. **Schaum's outline of Theory and problems of probability, random variables and random processes**. New York, NY. MacGraw-Hill, 1997, p. 125-137. ISBN: 0-07-030644-3.
- (54) GARDNER, W. A. **Introduction to random processes**. New York, NY. MacGraw-Hill, 1989, p. 32. ISBN: 0-07-022855-8.
- (55) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU), **AAS Antenna radiation patterns in the adjacent band, International Telecommunication Union (ITU) Document 5D/850-E**, 2018. <<https://www.itu.int/md/R15-WP5D-C-0850/en>>. Acesso em: 23 nov. 2021.

ANEXOS

ANEXO I – Parâmetros de entrada

(GENERAL)

```
#####
# Number of simulation snapshots
num_snapshots = 10000
#####
# IMT link that will be simulated (DOWNLINK or UPLINK)
imt_link = DOWNLINK
#####
# The chosen system for sharing study
# EESS_PASSIVE, FSS_SS, FSS_ES, FS, RAS
system = EESS_PASSIVE
#####
# Compatibility scenario (co-channel and/or adjacent channel interference)
enable_cochannel = False
enable_adjacent_channel = True
#####
# Seed for random number generator
seed = 101
#####
# if FALSE, then a new output directory is created
overwrite_output = True
```

(IMT)

```
#####
# Network topology. Possible values are "MACROCELL", "HOTSPOT", "SINGLE_BS"
# "INDOOR"
topology = HOTSPOT
#####
# Enable wrap around. Available only for "MACROCELL" and "HOTSPOT" topologies
wrap_around = false
```



```

#####
# Number of clusters in macro cell topology
num_clusters = 1
#####
# Inter-site distance in macrocell network topology (m)
intersite_distance = 3210.92
#####
# Minimum 2D separation distance from BS to UE (m)
minimum_separation_distance_bs_ue = 0
#####
# Defines if IMT service is the interferer or interfered-with service
# true : IMT suffers interference
# false : IMT generates interference
interfered_with = false
#####
# IMT center frequency (MHz)
frequency = 24350
#####
# IMT bandwidth (MHz)
bandwidth = 200
#####
# IMT resource block bandwidth (MHz)
rb_bandwidth = 0.180
#####
# IMT spectral mask. Options are "IMT-2020" and "3GPP 36.104"
spectral_mask = IMT-2020
#####
# level of spurious emissions (dBm/MHz)
spurious_emissions = -13
#####
# Amount of guard band wrt total bandwidth. Setting this parameter to 0.1
# means that 10% of the total bandwidth will be used as guard band: 5% in
# the lower
guard_band_ratio = 0.1

```

```

#####
# The load probability (or activity factor) models the statistical
# variation of the network load by defining the number of fully loaded
# base stations that are simultaneously transmitting
bs_load_probability = .208337
#####
# Conducted power per antenna element (dBm/bandwidth)
bs_conducted_power = 10
#####
# Base station height (m)
bs_height = 6
#####
# Base station noise figure (dB)
bs_noise_figure = 10
#####
# User equipment noise temperature (K)
bs_noise_temperature = 290
#####
# Base station array ohmic loss (dB)
bs_ohmic_loss = 3
#####
# Uplink attenuation factor used in link-to-system mapping
ul_attenuation_factor = 0.4
#####
# Uplink minimum SINR of the code set (dB)
ul_sinr_min = -10
#####
# Uplink maximum SINR of the code set (dB)
ul_sinr_max = 22
#####
# Number of UEs that are allocated to each cell within handover margin.
# Remember that in macrocell network each base station has 3 cells (sectors)
ue_k = 3
#####

```

```

# Multiplication factor that is used to ensure that the sufficient number
# of UE's will distributed throughout ths system area such that the number
# of K users is allocated to each cell. Normally, this values varies
# between 2 and 10 according to the user drop method
ue_k_m = 1
#####
# Percentage of indoor UE's (%)
ue_indoor_percent = 5
#####
# Regarding the distribution of active UE's over the cell area, this
# parameter states how the UEs will be distributed
# Possible values: UNIFORM : UEs will be uniformly distributed within the
#                   whole simulation area. Not applicable to
#                   hotspots.
#                   ANGLE_AND_DISTANCE : UEs will be distributed following
#                   given distributions for angle and
#                   distance. In this case, these must be
#                   defined later.
ue_distribution_type = ANGLE_AND_DISTANCE
#####
# Regarding the distribution of active UE's over the cell area, this
# parameter models the distance between UE's and BS.
# Possible values: RAYLEIGH, UNIFORM
ue_distribution_distance = RAYLEIGH
#####
# Regarding the distribution of active UE's over the cell area, this
# parameter models the azimuth between UE and BS (within  $\pm 60^\circ$  range).
# Possible values: NORMAL, UNIFORM
ue_distribution_azimuth = NORMAL
#####
# Power control algorithm
# ue_tx_power_control = "ON",power control On
# ue_tx_power_control = "OFF",power control Off
ue_tx_power_control = ON

```

```
#####  
# Power per RB used as target value (dBm)  
ue_p_o_pusch = -95  
#####  
# Alfa is the balancing factor for UEs with bad channel  
# and UEs with good channel  
ue_alpha = 1  
#####  
# Maximum UE transmit power (dBm)  
ue_p_cmax = 22  
#####  
# UE power dynamic range (dB)  
# The minimum transmit power of a UE is (ue_p_cmax - ue_dynamic_range)  
ue_power_dynamic_range = 63  
#####  
# UE height (m)  
ue_height = 1.5  
#####  
# User equipment noise figure (dB)  
ue_noise_figure = 10  
#####  
# User equipment feed loss (dB)  
ue_ohmic_loss = 3  
#####  
# User equipment body loss (dB)  
ue_body_loss = 4  
#####  
# Downlink attenuation factor used in link-to-system mapping  
dl_attenuation_factor = 0.6  
#####  
# Downlink minimum SINR of the code set (dB)  
dl_sinr_min = -10  
#####  
# Downlink maximum SINR of the code set (dB)
```

```

dl_sinr_max = 30
#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
#           "CI" (close-in FS reference distance)
#           "UMa" (Urban Macro - 3GPP)
#           "UMi" (Urban Micro - 3GPP)
#           "ABG" (Alpha-Beta-Gamma)
channel_model = UMi
#####
# LOS adjustment factor for UMi (3GPP version)
# As per 3GPP, original value is 18, which results in p_los at distribution
# center = 75% and p_los of coverage area = 65%.
# A modified value of 29 results in p_los at distribution center = 96% and
# p_los of coverage area = 79%.
los_adjustment_factor = 29
#####
# If shadowing should be applied or not
shadowing = true
#####
# System receive noise temperature (K)
noise_temperature = 290
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23

(IMT_ANTENNA)
#####
# Defines the antenna model to be used in compatibility studies between
# IMT and other services in adjacent band
# Possible values: SINGLE_ELEMENT, BEAMFORMING
adjacent_antenna_model = BEAMFORMING
#####
# If normalization of M2101 should be applied for BS
bs_normalization = FALSE
#####

```

```

# If normalization of M2101 should be applied for UE
ue_normalization = FALSE
#####
# File to be used in the BS beamforming normalization
# Normalization files can be generated with the
# antenna/beamforming_normalization/normalize_script.py script
bs_normalization_file = antenna/beamforming_normalization/bs_8x8_46_08.npz
#####
# File to be used in the UE beamforming normalization
# Normalization files can be generated with the
# antenna/beamforming_normalization/normalize_script.py script
ue_normalization_file = antenna/beamforming_normalization/ue_4x4_46_08.npz
#####
# Radiation pattern of each antenna element
# Possible values: "M2101", "F1336", "FIXED"
bs_element_pattern = M2101
ue_element_pattern = M2101
#####
# Minimum array gain for the beamforming antenna (dBi)
bs_minimum_array_gain = -200
ue_minimum_array_gain = -200
#####
# mechanical downtilt (degrees)
# NOTE: consider defining it to 90 degrees in case of indoor simulations
bs_downtilt = 6
#####
# BS/UE maximum transmit/receive element gain (dBi)
# default: bs_element_max_g = 5, for M.2101
#           = 15, for M.2292
# default: ue_element_max_g = 5, for M.2101
#           = -3, for M.2292
bs_element_max_g = 5
ue_element_max_g = 5
#####

```

```

# BS/UE horizontal 3dB beamwidth of single element (degrees)
bs_element_phi_3db = 65
ue_element_phi_3db = 90
#####
# BS/UE vertical 3dB beamwidth of single element (degrees)
# For F1336: if equal to 0, then beamwidth is calculated automatically
bs_element_theta_3db = 65
ue_element_theta_3db = 90
#####
# BS/UE number of rows in antenna array
bs_n_rows = 8
ue_n_rows = 4
#####
# BS/UE number of columns in antenna array
bs_n_columns = 8
ue_n_columns = 4
#####
# BS/UE array horizontal element spacing (d/lambda)
bs_element_horiz_spacing = 0.46
ue_element_horiz_spacing = 0.46
#####
# BS/UE array vertical element spacing (d/lambda)
bs_element_vert_spacing = 0.46
ue_element_vert_spacing = 0.46
#####
# BS/UE front to back ratio of single element (dB)
bs_element_am = 30
ue_element_am = 25
#####
# BS/UE single element vertical sidelobe attenuation (dB)
bs_element_sla_v = 30
ue_element_sla_v = 25
#####
# Multiplication factor k that is used to adjust the single-element pattern.

```

```
# According to Report ITU-R M.(IMT.AAS), this may give a closer match of the
# side lobes when beamforming is assumed in adjacent channel.
```

```
# Original value: 12 (Rec. ITU-R M.2101)
```

```
bs_multiplication_factor = 8
```

```
ue_multiplication_factor = 8
```

```
(HOTSPOT)
```

```
#####
```

```
# Number of hotspots per macro cell (sector)
```

```
num_hotspots_per_cell = 6
```

```
#####
```

```
# Maximum 2D distance between hotspot and UE (m)
```

```
# This is the hotspot radius
```

```
max_dist_hotspot_ue = 100
```

```
#####
```

```
# Minimum 2D distance between macro cell base station and hotspot (m)
```

```
min_dist_bs_hotspot = 0
```

```
(INDOOR)
```

```
#####
```

```
# Basic path loss model for indoor topology. Possible values:
```

```
# "FSPL" (free-space path loss),
```

```
# "INH_OFFICE" (3GPP Indoor Hotspot - Office)
```

```
basic_path_loss = "INH_OFFICE"
```

```
#####
```

```
# Number of rows of buildings in the simulation scenario
```

```
n_rows = 3
```

```
#####
```

```
# Number of columns of buildings in the simulation scenario
```

```
n_columns = 2
```

```
#####
```

```
# Number of buildings containing IMT stations. Options:
```

```
# 'ALL': all buildings contain IMT stations.
```

```
# Number of buildings.
```



```

num_int_buildings = ALL
#####
# Street width (building separation) (m)
street_width = 30
#####
# Intersite distance (m)
intersite_distance = 40
#####
# Number of cells per floor
num_cells = 3
#####
# Number of floors per building
num_floors = 1
#####
# Percentage of indoor UE's (0, 1)
ue_indoor_percent = .95
#####
# Building class: "TRADITIONAL" or "THERMALLY_EFFICIENT"
building_class = TRADITIONAL

(FSS_SS)
#####
# satellite center frequency (MHz)
frequency = 43000
#####
# satellite bandwidth (MHz)
bandwidth = 200
#####
# satellite altitude (m) and latitude (deg)
altitude = 35780000
lat_deg = 0
#####
# Elevation angle (deg)
elevation = 270

```

```

#####
# Azimuth angle (deg)
azimuth = 0
#####
# Peak transmit power spectral density (clear sky) (dBW/Hz)
tx_power_density = -5
#####
# System receive noise temperature (K)
noise_temperature = 950
#####
# adjacent channel selectivity (dB)
adjacent_ch_selectivity = 0
#####
# Satellite peak receive antenna gain (dBi)
antenna_gain = 46.6
#####
# Antenna pattern of the FSS space station
# Possible values: "ITU-R S.672", "ITU-R S.1528", "FSS_SS", "OMNI"
antenna_pattern = FSS_SS
# IMT parameters relevant to the satellite system
# altitude of IMT system (in meters)
# latitude of IMT system (in degrees)
# difference between longitudes of IMT and satellite system
# (positive if space-station is to the East of earth-station)
imt_altitude = 0
imt_lat_deg = 0
imt_long_diff_deg = 0
season = SUMMER
#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
# "SatelliteSimple" (FSPL + 4 + clutter loss)
# "P619"
channel_model = P619

```

```

#####
# The required near-in-side-lobe level (dB) relative to peak gain
# according to ITU-R S.672-4
antenna_1_s = -20
#####
# 3 dB beamwidth angle (3 dB below maximum gain) (degrees)
antenna_3_dB = 0.65
#####
# Constants
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23
EARTH_RADIUS = 6371000

(FSS_ES)
#####
# type of FSS-ES location:
# FIXED - position must be given
# CELL - random within central cell
# NETWORK - random within whole network
# UNIFORM_DIST - uniform distance from cluster centre,
#           between min_dist_to_bs and max_dist_to_bs
location = UNIFORM_DIST
#####
# x-y coordinates (m) (only if FIXED location is chosen)
x = 10000
y = 0
#####
# minimum distance from BSs (m)
min_dist_to_bs = 10
#####
# maximum distance from centre BSs (m) (only if UNIFORM_DIST is chosen)
max_dist_to_bs = 600
#####
# antenna height (m)
height = 6

```

```
#####  
# Elevation angle (deg), minimum and maximum, values  
elevation_min = 48  
elevation_max = 80  
#####  
# Azimuth angle (deg)  
# either a specific angle or string 'RANDOM'  
azimuth = RANDOM  
#####  
# center frequency (MHz)  
frequency = 43000  
#####  
# bandwidth (MHz)  
bandwidth = 6  
#####  
# System receive noise temperature (K)  
noise_temperature = 950  
#####  
# adjacent channel selectivity (dB)  
adjacent_ch_selectivity = 0  
#####  
# Peak transmit power spectral density (clear sky) (dBW/Hz)  
tx_power_density = -68.3  
#####  
# antenna peak gain (dBi)  
antenna_gain = 32  
#####  
# Antenna pattern of the FSS Earth station  
# Possible values: "ITU-R S.1855", "ITU-R S.465", "ITU-R S.580", "OMNI",  
# "Modified ITU-R S.465"  
antenna_pattern = Modified ITU-R S.465  
#####  
# Diameter of antenna (m)  
diameter = 1.8
```

```

#####
# Antenna envelope gain (dBi) - only relevant for "Modified ITU-R S.465" model
antenna_envelope_gain = 0
#####

# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
#           "TerrestrialSimple" (FSPL + clutter loss)
#           "P452"
#           "TVRO"
#           "HDFSS"
channel_model = P452
#####

# Constants
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23
EARTH_RADIUS = 6371000
#####

# P452 parameters
#####

# Total air pressure in hPa
atmospheric_pressure = 935
#####

# Temperature in Kelvin
air_temperature = 300
#####

#Sea-level surface refractivity (use the map)
N0 = 352.58
#####

#Average radio-refractive (use the map)
delta_N = 43.127
#####

#percentage p. Float (0 to 100) or RANDOM
percentage_p = 0.2
#####

#Distance over land from the transmit and receive antennas to the coast (km)

```

```

Dct = 70
#####
#Distance over land from the transmit and receive antennas to the coast (km)
Dcr = 70
#####
##Effective height of interfering antenna (m)
Hte = 20
#####
#Effective height of interfered-with antenna (m)
Hre = 3
#####
##Latitude of transmitter
tx_lat = -23.55028
#####
#Latitude of receiver
rx_lat = -23.17889
#####
#Antenna polarization
polarization = horizontal
#####
#determine whether clutter loss following ITU-R P.2108 is added (true/false)
clutter_loss = true
#####
# HDFSS propagation parameters
#####
# HDFSS position relative to building it is on. Possible values are
# ROOFTOP and BUILDINGSIDE
es_position = ROOFTOP
#####
# Enable shadowing loss
shadow_enabled = true
#####
# Enable building entry loss
building_loss_enabled = true

```

```

#####
# Enable interference from IMT stations at the same building as the HDFSS
same_building_enabled = false
#####
# Enable diffraction loss
diffraction_enabled = true
#####
# Building entry loss type applied between BSs and HDFSS ES. Options are:
# P2109_RANDOM: random probability at P.2109 model, considering elevation
# P2109_FIXED: fixed probability at P.2109 model, considering elevation.
#     Probability must be specified in bs_building_entry_loss_prob.
# FIXED_VALUE: fixed value per BS. Value must be specified in
#     bs_building_entry_loss_value.
bs_building_entry_loss_type = P2109_FIXED
#####
# Probability of building entry loss not exceeded if
# bs_building_entry_loss_type = P2109_FIXED
bs_building_entry_loss_prob = 0.75
#####
# Value in dB of building entry loss if
# bs_building_entry_loss_type = FIXED_VALUE
bs_building_entry_loss_value = 35

(FS)
#####
# x-y coordinates (m)
x = 1000
y = 0
#####
# antenna height (m)
height = 15
#####
# Elevation angle (deg)
elevation = -10

```

```

#####
# Azimuth angle (deg)
azimuth = 180
#####
# center frequency (MHz)
frequency = 27250
#####
# bandwidth (MHz)
bandwidth = 112
#####
# System receive noise temperature (K)
noise_temperature = 290
#####
# adjacent channel selectivity (dB)
adjacent_ch_selectivity = 20
#####
# Peak transmit power spectral density (clear sky) (dBW/Hz)
tx_power_density = -68.3
#####
# antenna peak gain (dBi)
antenna_gain = 36.9
#####
# Antenna pattern of the fixed wireless service
# Possible values: "ITU-R F.699", "OMNI"
antenna_pattern = ITU-R F.699
#####
# Diameter of antenna (m)
diameter = 0.3
#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
# "TerrestrialSimple" (FSPL + clutter loss)
channel_model = FSPL
#####

```


Constants

BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23

EARTH_RADIUS = 6371000

(HAPS)

#####

HAPS center frequency (MHz)

frequency = 27250

#####

HAPS bandwidth (MHz)

bandwidth = 200

#####

HAPS altitude (m) and latitude (deg)

altitude = 20000

lat_deg = 0

#####

Elevation angle (deg)

elevation = 270

#####

Azimuth angle (deg)

azimuth = 0

#####

EIRP spectral density (dBW/MHz)

eirp_density = 4.4

#####

HAPS peak antenna gain (dBi)

antenna_gain = 28.1

#####

Adjacent channel selectivity (dB)

acs = 30

#####

Antenna pattern of the HAPS (airbone) station

Possible values: "ITU-R F.1891", "OMNI"

```

antenna_pattern = ITU-R F.1891
# IMT parameters relevant to the HAPS system
# altitude of IMT system (in meters)
# latitude of IMT system (in degrees)
# difference between longitudes of IMT and satellite system
# (positive if space-station is to the East of earth-station)
imt_altitude = 0
imt_lat_deg = 0
imt_long_diff_deg = 0
season = SUMMER

#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
# "SatelliteSimple" (FSPL + 4 + clutter loss)
# "P619"
channel_model = P619

#####
# Near side-lobe level (dB) relative to the peak gain required by the system
# design, and has a maximum value of -25 dB
antenna_l_n = -25

#####
# Constants
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23
EARTH_RADIUS = 6371000

(RNS)

#####
# x-y coordinates (m)
x = 660
y = -370

#####
# altitude (m)

```

```

altitude = 150
#####
# center frequency (MHz)
frequency = 32000
#####
# bandwidth (MHz)
bandwidth = 60
#####
# System receive noise temperature (K)
noise_temperature = 1154
#####
# Peak transmit power spectral density (clear sky) (dBW/Hz)
tx_power_density = -70.79
#####
# antenna peak gain (dBi)
antenna_gain = 30
#####
# Adjacent channel selectivity (dB)
acs = 30
#####
# Antenna pattern of the fixed wireless service
# Possible values: "ITU-R M.1466", "OMNI"
antenna_pattern = ITU-R M.1466
#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
#           "SatelliteSimple" (FSPL + 4 dB + clutter loss)
#           "P619"
channel_model = P619
#####
# Specific parameters for P619
season = SUMMER
imt_altitude = 0
imt_lat_deg = 0

```

```
#####  
# Constants  
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23  
EARTH_RADIUS = 6371000  
  
(RAS)  
#####  
# x-y coordinates (m)  
x = 81000  
y = 0  
#####  
# antenna height (m)  
height = 15  
#####  
# Elevation angle (deg)  
elevation = 45  
#####  
# Azimuth angle (deg)  
azimuth = -90  
#####  
# center frequency (MHz)  
frequency = 43000  
#####  
# bandwidth (MHz)  
bandwidth = 1000  
#####  
# Antenna noise temperature (K)  
antenna_noise_temperature = 25  
#####  
# Receiver noise temperature (K)  
receiver_noise_temperature = 65  
#####  
# adjacent channel selectivity (dB)
```

```
adjacent_ch_selectivity = 20
#####
# Antenna efficiency
antenna_efficiency = 1
#####
# Antenna pattern of the FSS Earth station
# Possible values: "ITU-R SA.509", "OMNI"
antenna_pattern = ITU-R SA.509
#####
# Antenna gain for "OMNI" pattern
antenna_gain = 0
#####
# Diameter of antenna (m)
diameter = 15
#####
# Constants
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23
EARTH_RADIUS = 6371000
SPEED_OF_LIGHT = 299792458
#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
#           "TerrestrialSimple" (FSPL + clutter loss)
#           "P452"
channel_model = P452
#####
# P452 parameters
#####
# Total air pressure in hPa
atmospheric_pressure = 935
#####
# Temperature in Kelvin
air_temperature = 300
#####
```

```

#Sea-level surface refractivity (use the map)
N0 = 352.58
#####
#Average radio-refractive (use the map)
delta_N = 43.127
#####
#percentage p. Float (0 to 100) or RANDOM
percentage_p = 0.2
#####
#Distance over land from the transmit and receive antennas to the coast (km)
Dct = 70
#####
#Distance over land from the transmit and receive antennas to the coast (km)
Dcr = 70
#####
##Effective height of interfering antenna (m)
Hte = 20
#####
#Effective height of interfered-with antenna (m)
Hre = 3
#####
##Latitude of transmitter
tx_lat = -23.55028
#####
#Latitude of receiver
rx_lat = -23.17889
#####
#Antenna polarization
polarization = horizontal
#####
#determine whether clutter loss following ITU-R P.2108 is added (true/false)
clutter_loss = true

(EESS_PASSIVE)

```

```

#####
# sensor center frequency (MHz)
frequency = 23900
#####
# sensor bandwidth (MHz)
bandwidth = 200
#####
# Off-nadir pointing angle (deg)
nadir_angle = 46.6
#####
# sensor altitude (m)
altitude = 828000
#####
# Antenna pattern of the sensor
# Possible values: "ITU-R RS.1813", "OMNI"
antenna_pattern = ITU-R RS.1813
# Antenna efficiency for pattern described in ITU-R RS.1813 (0-1)
antenna_efficiency = 0.6
# Antenna diameter for ITU-R RS.1813 (m)
antenna_diameter = 2.2
#####
# receive antenna gain - valid only for "OMNI" (dBi)
antenna_gain = 52
#####
# Channel parameters
# channel model, possible values are "FSPL" (free-space path loss),
#           "P619"
channel_model = P619
# Relevant IMT parameters which apply for ITU-R P.619
# altitude of IMT system (in meters)
# latitude of IMT system (in degrees)
# season of the year: "SUMMER", "WINTER"
imt_altitude = 20
imt_lat_deg = -22.9

```

```
season = SUMMER
```

```
#####
```

```
# Constants
```

```
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38064852e-23
```

```
EARTH_RADIUS = 6371000
```

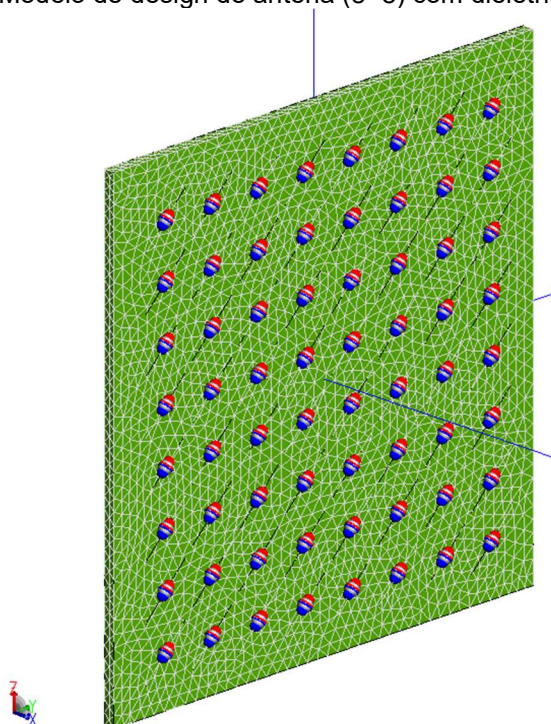

ANEXO II – Parâmetros de entrada

Simulações do padrão de radiação da antena AAS referenciados no Documento 5D/545-E da UIT-R (52) foram realizadas usando o Método dos Momentos (MoM) sendo FEKO o nome do software de simulação MoM. Todos os parâmetros elétricos dos materiais foram levados em consideração, bem como o acoplamento entre os elementos radiantes, conforme apresentado na Figura 38.

Para sistemas radiantes da Estação Rádio Base, as antenas possuem um módulo de elemento radiante cruciforme, ou seja, alinhado usando radiadores dipolos, radiadores de patch ou radiadores de ranhura como radiadores primários, em ângulos de $+45^\circ$ e -45° em relação à vertical ou horizontal. Os sinais em duas polarizações ortogonais ajudam a reduzir o desvanecimento causado por reflexos múltiplos em edifícios, árvores e outros.

O tamanho da tela metálica da antena AAS é 51,9 mm x 51,9 mm. A frequência de projeto foi escolhida como 26 GHz. O espaçamento entre os elementos é de 5,77 mm, obtendo $d/\lambda = 0.5$.

Figura 39 - Modelo de design de antena (8x8) com dielétrico laminado



Fonte: Documento 5D/850-E da UIT-R (55)

Os seguintes parâmetros foram usados na simulação do padrão de antena da Estação Rádio Base (8 x 8):

- Antena micro fita (8×8) da Estação Rádio Base composta por radiadores duplos dipolo com polarização a -45° em uma tela metálica no laminado RT / duroid 5870.

O laminado RT / duroid 5870 tem os seguintes parâmetros elétricos:

- constante dielétrica, $\epsilon_r = 2,33$
- fator de dissipação, $\tan \delta = 0,0012$
- espessura do laminado: 1,23 mm
- distância entre tela metálica e dipolos: 1,85 mm.