



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**PROTEÇÃO DE CANAL DE COMUNICAÇÃO CRÍTICO
EM SISTEMA DE CONTROLE DE SATÉLITE
POR MEIO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO**

Rafael Pinto Prata

Brasília, Dezembro de 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

**PROTEÇÃO DE CANAL DE COMUNICAÇÃO CRÍTICO
EM SISTEMA DE CONTROLE DE SATÉLITE
POR MEIO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO**

**PROTECTING CRITICAL COMMUNICATION CHANNEL
IN SATELLITE CONTROL SYSTEM BY MEANS OF PROTECTION BELT**

RAFAEL PINTO PRATA

**ORIENTADOR : RAFAEL TIMÓTEO DE SOUSA JÚNIOR
COORIENTADOR : AGOSTINHO LINHARES DE SOUZA FILHO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

PUBLICAÇÃO: PPEE.MP.007

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO - 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**PROTEÇÃO DE CANAL DE COMUNICAÇÃO CRÍTICO
EM SISTEMA DE CONTROLE DE SATÉLITE
POR MEIO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO**

Rafael Pinto Prata

*Dissertação de Mestrado Profissional submetida ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Prof. Rafael Timóteo de Sousa Jr, Ph.D., FT/UnB
Orientador

Prof. Rafael Rabelo Nunes, Dr., FT/UnB
Examinador interno

Alexandre Campos Moraes, Dr.
Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

PINTO PRATA, RAFAEL

PROTEÇÃO DE CANAL DE COMUNICAÇÃO CRÍTICO EM SISTEMA DE CONTROLE DE SATÉLITE POR MEIO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO [Distrito Federal] 2020.

xvi, 66 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2020).

Dissertação de Mestrado Profissional - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Compartilhamento de Espectro

2. 5G

3. Satélite

4. Segurança Cibernética

I. ENE/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PRATA, R.P. (2020). *PROTEÇÃO DE CANAL DE COMUNICAÇÃO CRÍTICO EM SISTEMA DE CONTROLE DE SATÉLITE POR MEIO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO*. Dissertação de Mestrado Profissional, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 66 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rafael Pinto Prata

TÍTULO: PROTEÇÃO DE CANAL DE COMUNICAÇÃO CRÍTICO EM SISTEMA DE CONTROLE DE SATÉLITE POR MEIO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO.

GRAU: Mestre em Engenharia Elétrica ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado Profissional e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Dissertação de Mestrado Profissional pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Rafael Pinto Prata

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus familiares, que me proporcionaram educação e valores fundamentais para modificar positivamente o ambiente à minha volta, e à minha esposa, Patrícia Rodrigues Ferreira, que me acompanha nesta linda caminhada chamada "vida"...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que compartilharam comigo este período desafiador, em especial ao meu Orientador Rafael Timóteo de Sousa Júnior, que acreditou na proposta de trabalho que apresentei, e a meu Coorientador Agostinho Linhares de Souza Filho, que além de líder no ambiente de trabalho, me incentivou desde o primeiro dia a encarar este desafio e estimular meu desenvolvimento permanente. Aos meus colegas de trabalho, familiares, amigos, colegas de turma e mestres desta renomada Universidade que lecionaram ou contribuíram de alguma maneira na busca pelo objetivo desta jornada.

Muito obrigado àqueles que desenvolveram trabalhos anteriores, e dedicaram seu tempo contribuindo para que eu desenvolvesse o presente trabalho. Por fim, agradeço a todos que valorizam a ciência e acreditam em seu potencial para o desenvolvimento humano, em todas as áreas da nossa sociedade.

Título: Proteção de canal de comunicação crítico em sistema de controle de satélite por meio de Cinturão de Proteção

Autor: Rafael Pinto Prata

Orientador: Rafael Timóteo de Sousa Júnior, Dr.

Coorientador: Agostinho Linhares de Souza Filho, Dr.

Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Elétrica (Mestrado) - Área de Concentração em Segurança Cibernética

Brasília, 2 de dezembro de 2020

A Conferência Mundial de Radiocomunicações 2019 (WRC-19) da União Internacional de Telecomunicações (UIT) decidiu pela identificação de faixas de radiofrequência em ondas milimétricas que serão compartilhadas entre o 5G (IMT-2020) e redes de satélite, incluindo a faixa de 40 GHz. No futuro, estações terrenas de rastreamento, telemetria e comando de satélites (TT&C) também poderão vir a operar em bandas Q e V (40/50 GHz). Com isso, torna-se relevante o desenvolvimento de estudos para a adoção de técnicas inovadoras de mitigação que reduzam risco de indisponibilidade por radiointerferência gerada pelo 5G, tendo em vista que aplicações de TT&C são de alta criticidade para a operação do satélite.

Este trabalho objetiva desenvolver solução de mitigação de risco de radiointerferência que ameaça a segurança de infraestrutura de comunicações via satélite, em camada física, com técnica para convivência com o 5G, e no intuito de garantir a disponibilidade de sistema TT&C. O foco principal se dá na avaliação de resultados de simulações da interferência agregada do 5G sobre uma estação terrena TT&C, com uso de ferramenta que implementa metodologia da UIT, e seguindo preceitos do uso eficiente do espectro. O estudo avalia diferentes configurações para redução da interferência agregada levando em consideração resultados de variações de parâmetros de arranjo de antenas 5G, tais como número de elementos, potência conduzida por elemento e ângulo de *downtilt*.

Os resultados demonstram os efeitos positivos ao reduzir até 10% dos casos em que o parâmetro razão interferência-ruído (I/N) agregado excede o critério de proteção, como decorrência da adoção de configuração mais restritiva às estações 5G operando em área nas proximidades da estação terrena TT&C.

Como contribuição principal, o trabalho apresenta o conceito de "Cinturão de Proteção" como um modelo para proteção das comunicações TT&C contra radiointerferências prejudiciais, reduzindo a necessidade de uma extensa zona de exclusão ao redor da estação TT&C. A solução busca viabilizar uma operação segura em faixas de frequência compartilhadas com o 5G, ao mesmo tempo em que faz uso mais eficiente do espectro de radiofrequências. Adicionalmente, pode-se considerar a aplicação do conceito de "Cinturão de Proteção" em outros cenários de convivência do 5G com Serviço Fixo por Satélite (FSS), inclusive em outras faixas de radiofrequência além de 40 GHz.

ABSTRACT

Title: Protecting critical communication channel in satellite control system by means of Protection Belt

Author: Rafael Pinto Prata

Supervisor: Rafael Timóteo de Sousa Júnior, Ph.D.

Co-Supervisor: Agostinho Linhares de Souza Filho, Dr.

Professional Post-Graduate Program in Electrical Engineering (Master of Science) – Cybersecurity Concentration Area

Brasília, December 2nd, 2020

The World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) of the International Telecommunication Union (ITU) decided on the identification of frequency bands in millimeter waves that will be shared between 5G and satellite networks, including the 40 GHz band. In the future, earth stations for tracking, telemetry and command (TT&C) may also operate in the Q and V bands (40/50 GHz). Therefore, it is relevant to develop studies for the adoption of mitigation techniques that reduce the risk of unavailability due to radio interference generated by 5G, considering that TT&C are highly critical applications for satellite operation.

This work aims at developing risk mitigation solution for radio interference threatening the satellite communication infrastructure, in the physical layer, with technique for coexistence with 5G, in order to ensure the TT&C system availability. The main focus is given in the evaluation of simulation results of the 5G aggregate interference over a TT&C earth station, making use of a tool which implements ITU methodology, and following the basis of efficient use of spectrum. The study evaluates configurations for reducing the aggregate interference taking into account the results of variations on the 5G antenna array parameters, such as number of elements, conducted power per element and downtilt angle.

The results demonstrate the positive effects by reducing up to 10% of cases in which the aggregate interference-to-noise ratio (I/N) parameter exceeds the protection criteria, as a consequence of the adoption of more restrictive configuration to 5G stations operating in the vicinity of TT&C earth station.

As a main contribution by this work, it presents the "Protection Belt" concept as a model for the protection of TT&C communication against harmful radio interference, reducing the need for an extensive exclusion zone around the TT&C station. The solution looks for enabling safe operations in frequency bands shared with 5G, while a more efficient use of radiofrequency spectrum is promoted. Additionally, it can be considered the application of the "Protection Belt" concept in other scenario of coexistence between 5G and Fixed Satellite Service (FSS) earth station, including frequency bands other than 40 GHz.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	5
1.3	PUBLICAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES	5
1.4	ORGANIZAÇÃO	6
2	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO	8
2.1	ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	8
2.2	SISTEMA MÓVEL 5G (IMT-2020)	11
2.3	CONCEITOS BÁSICOS DE REDE DE ACESSO RÁDIO 5G UTILIZADOS	13
3	SEGURANÇA CIBERNÉTICA EM REDES DE SATÉLITES	16
3.1	PRINCÍPIOS DA SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO	17
3.2	RADIOINTERFERÊNCIA E INCIDENTES DE INDISPONIBILIDADE EM SATÉLITES	18
3.3	OUTROS RISCOS À SEGURANÇA (INTEGRIDADE E CONFIDENCIALIDADE)	22
4	COMPARTILHAMENTO DE ESPECTRO	24
4.1	ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA E A PROTEÇÃO DE SERVIÇOS VIA SATÉLITE	24
4.2	MODELOS DE PROPAGAÇÃO E DE CANAL APLICADOS	30
4.3	DIAGRAMAS DE ANTENA E PADRÃO DE CONFORMAÇÃO DE FEIXES	39
5	METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS OBTIDOS	46
5.1	CONCEITO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO TT&C	46
5.2	METODOLOGIA APLICADA NAS SIMULAÇÕES	47
5.3	PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO	50
5.4	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	53
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

1.1	Cenários de uso IMT-2020 (5G) (fonte : Rec. ITU-R M.2083).....	2
1.2	Telemetria, Rastreamento e Controle de satélite (adaptado de Rec. ITU-R S.1716).....	3
1.3	Redes de Satélites (<i>filings</i>) com TT&C em Q/V em coordenação na UIT por posição orbital	4
2.1	Elementos de um sistema de comunicação (adaptado de (1))	9
2.2	Aprimoramentos do 5G em relação ao 4G (fonte: Rec. ITU-R M.2083).....	12
2.3	Geometria de macro célula.....	14
2.4	macro célula e <i>hotspot</i>	14
2.5	Agrupamento de macro células (<i>cluster</i>)	15
3.1	Classificação de interferências em satélites	19
4.1	Zonas de restrição para proteção de estações terrenas TT&C em Hong Kong	27
4.2	Modos de coordenação envolvendo redes de satélites (fonte: <i>ITU Radio Regulations</i>)	28
4.3	Atenuação atmosférica de (adaptado Rec. ITU-R P.676).....	29
4.4	Perda de penetração em edificação (fonte: Rec. ITU-R P.2109).....	29
4.5	Representação gráfica de termos usados no conceito de perda de transmissão (2) (adaptação do autor)	32
4.6	Mecanismos de Propagação de Longo Prazo (fonte: Rec. ITU-R P.452).....	34
4.7	Mecanismos de Propagação de Curto Prazo (fonte: Rec. ITU-R P.452).....	34
4.8	Perda por obstruções <i>Clutter</i> em enlaces terrestres (fonte: ITU-R P.2108)	36
4.9	Mapa mental resumindo aplicação dos modelos de predição do percurso da interferência (fonte: autor).....	37
4.10	Conformação de feixes (conceito genérico).....	40
4.11	Geometria do modelo de antena - ITU-R M.2101	40
4.12	Diagramas vertical ($A_{E,V}(\theta)$) e horizontal ($A_{E,H}(\phi)$) do elemento (3)	42
4.13	Zona ao redor do arco geo na qual os objetivos de projeto de antenas de estação terrena se aplicam (ITU-R S.580).....	44
4.14	Envoltória do diagrama de antena da estação terrena (4)	45
5.1	Conceito de Cinturão de Proteção TT&C (fonte: autor)	46
5.2	Modelo Coroa Circular - Cinturão de Proteção TT&C (fonte: autor)	48
5.3	Cenário de interferência em <i>downlink</i> de estação TT&C	48
5.4	Sumário de cálculos, modelos de propagação, canal e diagramas de antena.....	50
5.5	<i>Cluster</i> de <i>hotspots</i> distribuídos em uma fotografia (<i>snapshot</i>) da simulação	52
5.6	<i>Uplink</i> vs <i>Downlink</i> para distância de 150 m de separação da estação TT&C até a borda do cinturão.....	53
5.7	Curvas de I/N para 0 m, 150 m, 300 m e 500 m	54
5.8	Curvas de I/N para diferentes arranjos de antena da estação base IMT	55

5.9	CDF do ganho de antena da estação base IMT em direção à estação TT&C para diferentes arranjos.....	56
5.10	Diagramas de radiação de antena para diferentes arranjos	56
5.11	Curvas de I/N para 8 dBm / 200 MHz e 5 dBm / 200MHz (-3 dB) por elemento	57
5.12	Curvas de I/N para 10 e 20 graus de <i>downtilt</i> da antena da estação base IMT	58
5.13	Curvas de I/N para diferentes configurações de cinturões de proteção TT&C	59

LISTA DE TABELAS

5.1	Configuração de referência para o canal de <i>downlink</i> da estação terrena TT&C	50
5.2	Configuração de referência para o enlace de <i>downlink</i> do IMT	51
5.3	% de casos em que critério de proteção é excedido para diferentes arranjos de antena de estação base.....	55
5.4	% redução de casos em que critério de proteção é excedido após redução de 3 dB de potência por elemento	57
5.5	de redução de casos em que critério é excedido com 10 graus de <i>downtilt</i> de antena da estação base IMT	58

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ACRÔNIMOS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	4a geração de telefonia móvel
5G	5a geração de telefonia móvel
AAS	Sistemas Avançados de Antena
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$A_{cinturao}$	É a área da coroa relativa ao cinturão de proteção TT&C
A_m	relação frente-costa do elemento
AMA	Associação para Sensores e Medição
AMT	Telemetria Móvel Aeronáutica
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	Estação base
B	Largura de banda de operação
C	Capacidade máxima de dados do canal
C/N	Razão portadora-ruído
CCDF	Função de distribuição cumulativa complementar
CDF	Função de distribuição cumulativa
CEPT	Conferência Europeia de Administrações de Correios e Telecomunicações
COVID-19	Doença do Coronavírus 2019 (<i>Coronavirus disease</i>)
d_{2D}	Distância 2D (em solo) entre a antena da estação base e o terminal
d_{2D-out}	Distância 2D (em solo) entre a antena da estação base e a edificação, ou seja, relativa ao trecho <i>outdoor</i>
d_{3D}	Distância 3D entre a antena da estação base e o terminal
d'_{BP}	Distância de ponto de quebra
dB	Decibel
d_H	Espaçamento horizontal entre elementos
d_V	Espaçamento vertical entre elementos
EIRP	Potência equivalente isotropicamente irradiada (<i>effective isotropic radiated power</i>)
eMBB	Banda larga móvel aprimorada (<i>enhanced mobile broadband</i>)
epfd	Densidade de fluxo de potência equivalente (<i>equivalent power flux density</i>)
ETTC	Conferência Européia de Teste e Telemetria (<i>European Test and Telemetry Conference</i>)
f_c	Frequência central de operação

FBI	Escritório Federal de Investigações dos Estados Unidos (<i>Federal Bureau of Investigation</i>)
FSS	Serviço Fixo por Satélite
G	Ganho em relação a uma antena isotrópica
$G_{E,max}$	Ganho máximo do elemento
G_r	Ganho de diretividade da antena receptora
G_t	Ganho de diretividade da antena transmissora
G_{rx}	Ganho da antena da estação terrena TT&C na direção da estação base IMT
G_{tx}	Ganho da antena da estação base IMT na direção da antena da estação terrena TT&C
GHz	Gigahertz
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
GSI	Gabinete de Segurança Institucional
GSO	Órbita geossíncrona (obs: "satélite GSO"equivale a "satélite geoestacionário")
GVF	<i>Global VSAT Forum</i>
HAPS	Plataformas em alta altitude (<i>High altitude platforms</i>)
Hz	Hertz
$I_{external}$	Interferência externa agregada em direção ao sistema interferido
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
I/N	Razão Interferência-Ruído
IMT	Telecomunicações Móveis Internacionais
IMT-2020	Telecomunicações Móveis Internacionais 2020
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
ISAC	<i>Space Information Sharing and Analysis Center</i>
ISO	Organização Internacional de Padronização
ITU-R	Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações
J/K	Joule por Kelvin
K	Kelvin
k	Constante de <i>Boltzmann</i>
kHz	Kilohertz
L	Perda de Transmissão
L_b	Perda de Transmissão Básica
L_{bf}	Perda de Transmissão Básica Espaço Livre
L_l	Perda Total
L_m	Perda relativa ao espaço livre
LOS	Linha de Visada
L_s	Perda do sistema
L_{rc}	Perda no circuito de recepção
L_{tc}	Perda no circuito de transmissão
Mbps	Megabits por segundo
MCL	Mínima perda de acoplamento (<i>Minimum Coupling Loss</i>)
MHz	Megahertz
MIMO	Múltiplas entradas múltiplas saídas (<i>Multiple input multiple output</i>)

mMTC	Comunicação massiva de máquinas (<i>Massive machine time communication</i>)
N	Número de elementos
$N_{estacoes}$	Total de estações IMT interferentes que operam no cinturão
N_H	Quantidade de colunas do arranjo de antena
N_V	Quantidade de linhas do arranjo de antena
$P_{acoplamento}$	Perda de acoplamento
$P_{propag.}$	Perda de propagação
$P_{polariz.}$	Perda de polarização
PL	Perda de Percurso
NBR	Norma Técnica Brasileira
NLOS	Sem linha de visada
RB	Bloco de recurso (<i>Resource Block</i>)
RF	Radiofrequência
RR	Regulamento de Radiocomunicações da UIT (<i>Radio Regulations</i>)
SDA	<i>Space Data Association</i>
SHARC	Simulador <i>SHARing and Compatibility studies</i>
SLA_v	Atenuação de lóbulo secundário do elemento
SINR	Razão Sinal-Interferência mais Ruído
SNR	Razão Sinal-Ruído
T	Temperatura de Ruído do Sistema
TDD	Duplexação por divisão de tempo (<i>time division duplex</i>)
TG 5/1	Grupo Tarefa 5/1 (<i>Task Group 5/1</i>)
TT&C	Telemetria, Rastreo e Comando
TV	Televisão
UE	Terminal de usuário
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UMi	<i>Urban Micro</i>
URA	Arranjo retangular uniforme
URLLC	Comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (<i>Ultra reliable low latency communication</i>)
$v_{m,n}$	Vetor superposição
VSATs	Estação Terrena de Pequeno Porte (<i>Very Small Aperture Terminals</i>)
WP4A	Grupo de Trabalho 4A - Uso Eficiente de Órbita/Espectro para Serviços Fixo por Satélite e Radiodifusão por Satélite
WP5D	Grupo de Trabalho 5D - IMT (<i>Working Party 5D</i>)
WRC-19	Conferência Mundial de Radiocomunicações 2019
\tilde{W}	Fator de arranjo
W	Vetor de consignação de pesos

Gregos

$A_A(\theta, \phi)$	Diagrama de conformação de feixe composto
$A_E(\theta, \phi)$	Diagrama do elemento do arranjo de antena
$\beta_0(\%)$	Percentual de tempo que o intervalo do índice de refração pode exceder 100 unidades nos 100m da atmosfera mais baixa
$A_{E,V}(\theta)$	Diagrama de radiação vertical do elemento
$A_{E,H}(\phi)$	Diagrama de radiação horizontal do elemento
ΔN	Gradiente de refração
$\rho_{estacoes}$	Densidade de estações IMT no Cinturão
ϕ	Ângulo de azimute da direção
$\phi_{fora\ eixo}$	Ângulo fora de eixo do lóbulo principal, na direção do arco geostacionário
ϕ_{3dB}	Ângulo de meia potência horizontal
ϕ_{escan}	Ângulo de direcionamento elétrico do feixe na horizontal
λ	Comprimento de onda
σ_{SF}	Desvio padrão de <i>shadow fading</i>
θ	Ângulo de elevação da direção do sinal na conformação de feixe
θ_{3dB}	Ângulo de meia potência vertical
θ_{tilt}	Ângulo entre a direção de ganho máximo da antena e o plano horizontal

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo irá contextualizar o tema da dissertação, apresentar o problema a ser endereçado, bem como os objetivos e contribuições fornecidas por este trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em 2015, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) definiu o conceito de Infraestruturas Críticas de Telecomunicações (5) como “instalações, serviços, bens e sistemas, afetos à prestação de serviços de telecomunicações, que, se forem interrompidos ou destruídos, provocarão sério impacto social, econômico, político, internacional ou à segurança do Estado e da sociedade”. O satélite se encaixa como um tipo de infraestrutura claramente presente em diversos cenários que podem ser classificados como de aplicação em infraestrutura crítica de telecomunicações.

Em função da vasta região geográfica do Brasil, o satélite é escolhido de maneira recorrente em projetos como uma opção de infraestrutura de telecomunicações adotada em situações em que foram descartadas todas as possibilidades de atendimento por meio de redes terrestres. Satélites também são aplicados muitas vezes como opção de redundância para garantir a comunicação em casos de indisponibilidade do meio de comunicação primário. Quando acionado, o satélite passa a assumir um papel de altíssima relevância, e a segurança das comunicações por esse meio torna-se ainda mais importante.

Com a evolução tecnológica, novas oportunidades e desafios se apresentam, sendo importante adotar, continuamente, tecnologias que aumentem a confiabilidade dos sistemas via satélite, tanto em termos de disponibilidade quanto de segurança das informações trafegadas. Atualmente, a maioria dos sistemas de comunicação banda larga via satélite é implementado a partir do enlace de comunicação entre uma estação terrena fixa comunicando com um satélite geoestacionário (aproximadamente 36.000 km de altitude), normalmente utilizando frequências em bandas Ku ou Ka. Considerando a consolidação da banda Ka, o mercado de satélites já se movimenta para o uso comercial das bandas Q e V, em torno de 40 e 50 GHz. Seu uso é vislumbrado para satélites geoestacionários e não geoestacionários.

Um dos principais propulsores para a economia 4.0 serão as redes móveis de 5ª Geração (5G), padronizada no âmbito da União Internacional de Telecomunicações (UIT) por meio de recomendações de Telecomunicações Móveis Internacionais (IMT-2020). Os requisitos técnicos do IMT-2020 (6) demandam enormes quantidades de recursos de espectro, o que representa um grande desafio para administrações, e requerem novas abordagens na área de estudo de gestão do espectro.

A Conferência Mundial de Radiocomunicações 2019 da UIT (WRC-19) identificou 17,25 GHz de espectro em ondas milimétricas para uso pelo IMT. As faixas recém identificadas são 24,25-27,5 GHz, 37-43,5 GHz, 45,5-47 GHz, 47,2-48,2 GHz e 66-71 GHz (7). No contexto deste trabalho, destaca-se a nova nota de rodapé do RR, 5.550B, aplicável à faixa 37-43 GHz, incorporada à tabela internacional de atribuições, conforme abaixo.

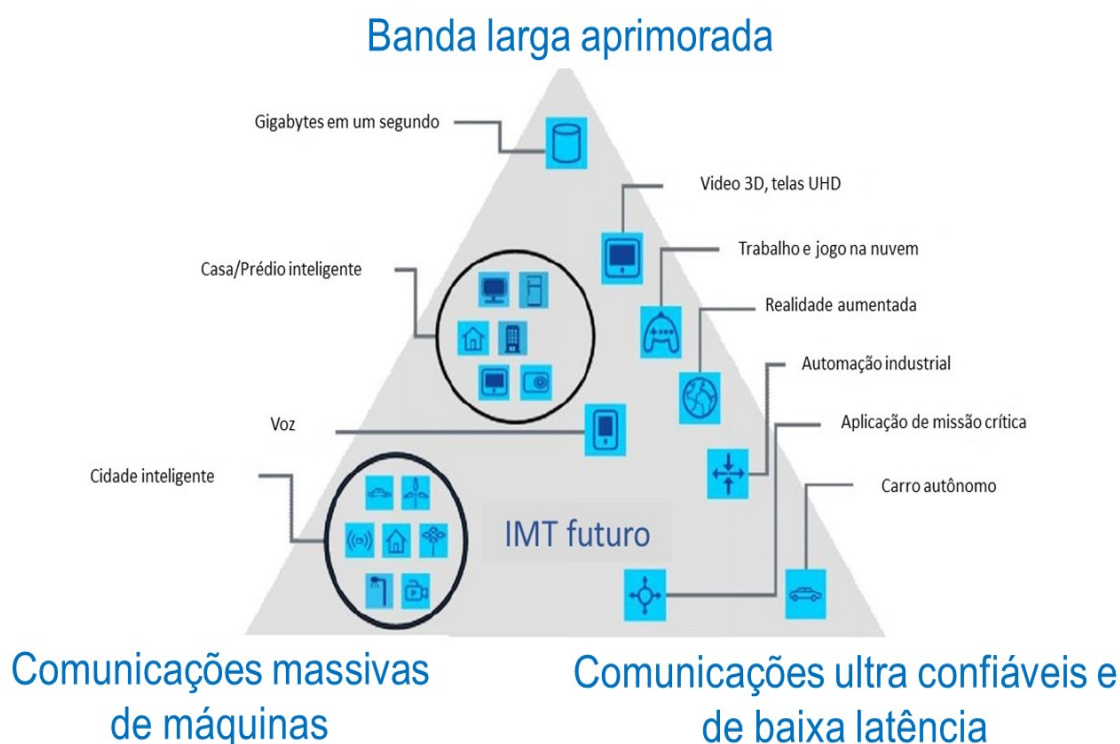


Figura 1.1: Cenários de uso IMT-2020 (5G) (fonte : Rec. ITU-R M.2083)

“5.550B a faixa de frequência de 37 a 43,5 GHz, ou partes, é identificada para uso pelas administrações que desejarem implementar a componente terrestre de Telecomunicações Móveis Internacionais (IMT). Esta identificação não impede o uso desta faixa por nenhuma aplicação dos serviços para os quais a faixa está atribuída e não estabelece prioridade no Regulamento de Radiocomunicações. Tendo em vista a potencial implantação de estações terrenas do Serviço Fixo por Satélite (FSS) na faixa de 37,5 a 42,5 GHz e de aplicações de alta densidade no serviço fio por satélite nas bandas 39,5 a 40 GHz na Região 1, 40 a 40,5 GHz em todas as regiões e 40,5 a 42 GHz na Região 2 (ver também nota 5.516B), administrações devem levar em conta potenciais restrições ao IMT nessas faixas, conforme apropriado. Resolução 243 (WRC-19) é aplicável.

Após a WRC-19, a identificação dessas faixas passou a ser refletida no Regulamento de Radiocomunicações (RR) da UIT, o qual possui status de tratado internacional. Tendo em vista o caráter global do uso do espectro e órbitas de satélites, o RR é internalizado aos arcabouços regulatórios nacionais, respeitando a soberania dos países na definição do uso do espectro nacional. No Brasil, definições e regramentos do RR são absorvidos por diferentes regulamentos da Anatel. O Relatório ITU-R SM.2093 (8) trata de diretrizes e estrutura para gestão do espectro nacional, e endereça questões relativas às implicações do arcabouço internacional de espectro e órbitas, o qual tem no RR seu instrumento mais relevante.

Em sistemas de satélites, o subsistema de rastreamento, telemetria e comando (TT&C) é responsável pelas funções de monitoração e controle da estação espacial durante o ciclo de vida operacional. Em resumo, a função de rastreamento coleta informações sobre ângulos, distância e velocidade para estimar a posição do satélite em sua órbita. A função de telemetria coleta dados do status operacional do satélite permitindo que o centro de controle do satélite monitore continuamente suas condições. O subsistema de telecomando

recebe todas as informações, incluindo aquelas recebidas dos subsistemas de telemetria e rastreamento, e envia comandos para a estação espacial.

Os subsistemas de rastreamento e telemetria são baseados em *downlink*, e o subsistema de telecomando é baseado em *uplink*, conforme a figura 1.2 (9) de recomendação da UIT.

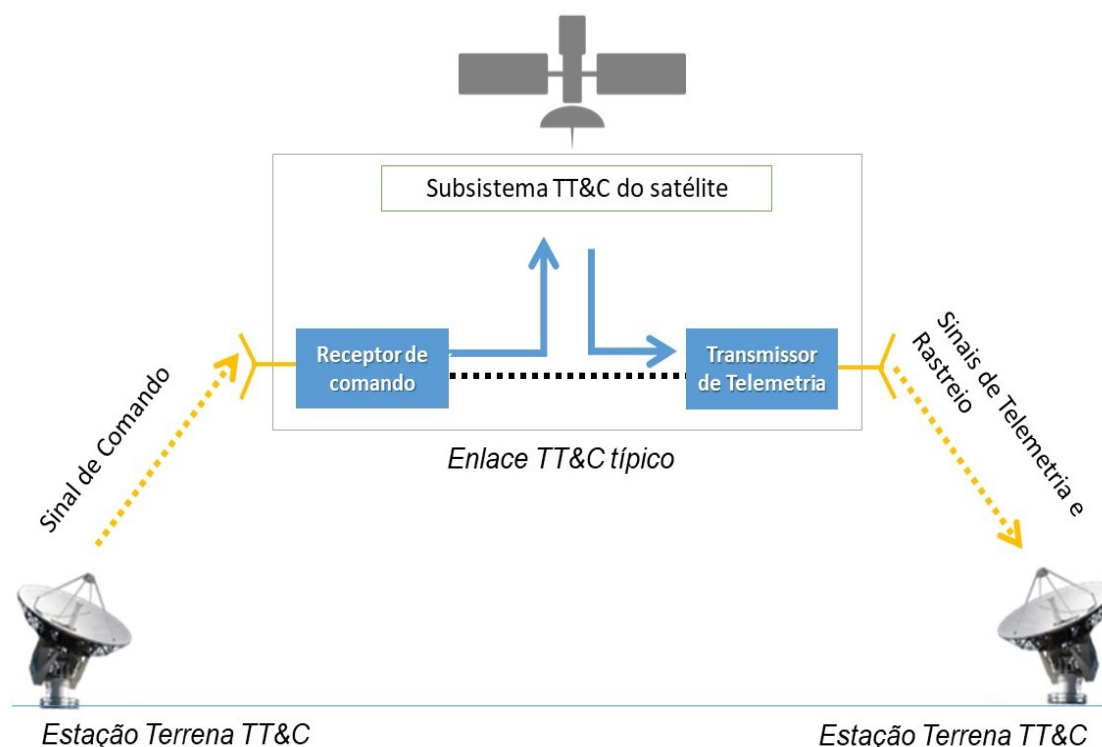


Figura 1.2: Telemetria, Rastreamento e Controle de satélite (adaptado de Rec. ITU-R S.1716)

Em nível regulatório, o artigo 1º do RR da UIT (7) define que (tradução livre):

“1.133 telemetria espacial: Uso de telemetria para a transmissão pela estação espacial, de resultados de medições realizadas na estação espacial, incluindo aquelas relacionadas ao seu funcionamento.

1.135 telecomando espacial: Uso de radiocomunicação para transmissão de sinais para a estação espacial para iniciar, modificar ou encerrar funções de equipamento em um objeto espacial associado, incluindo a estação espacial.

1.136 rastreamento espacial: Determinação da órbita, velocidade ou posição instantânea de um objeto no espaço por meio de radiodeterminação, excluindo radar primário, para o propósito de seguir o movimento do objeto.”

Os sistemas TT&C são diferentes subsistemas trabalhando em conjunto, integrados, de forma que o perfeito funcionamento dos processos de comando e controle do satélite dependem em sua total disponibilidade. Suas estações terrenas são consideradas uma parte crucial de infraestruturas críticas de comunicações via satélite.

Interferências prejudiciais a canais de *downlink* de telemetria e telecomando podem causar a total perda de contato com a estação espacial, afetando serviços potencialmente prestados a milhões de usuários. Neste sentido, está clara a alta criticidade de tais sistemas de comunicação e a necessidade de garantir sua

proteção de radio interferências.

Atualmente, a maioria dos sistemas de comunicação banda larga via satélite é implementada a partir do enlace de comunicação entre uma estação terrena fixa comunicando com um satélite geoestacionário, normalmente utilizando frequências em bandas Ku ou Ka. Considerando a consolidação da banda Ka, o mercado de satélites já se movimenta para o uso comercial das bandas Q e V, que giram em torno de 40 e 50 GHz.

A crescente relevância de estudos sobre prevenção de interferência em estações terrenas TT&C em bandas Q e V reside no fato que há cerca de 200 redes de satélites (*filings*) sob processo de coordenação no âmbito da União Internacional de Telecomunicações os quais possuem capacidades específicas de TT&C nessas bandas de frequências. Suas posições orbitais no arco geoestacionário estão distribuídas ao redor do globo, conforme figura 1.3. Estes *filings* refletem projetos de satélites a serem lançados e entrarem em operação em até 7 anos.

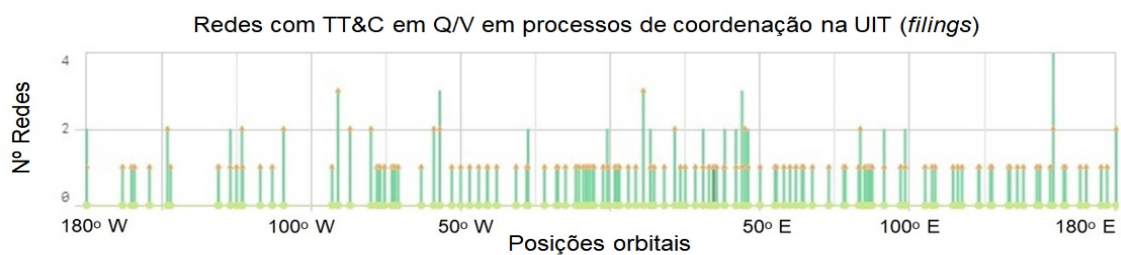


Figura 1.3: Redes de Satélites (*filings*) com TT&C em Q/V em coordenação na UIT por posição orbital

O presente trabalho endereça potenciais soluções de restrição ao IMT no uso compartilhado da faixa de 37 a 43,5 GHz com o Serviço Fixo por Satélite (FSS), especialmente considerando seu possível uso também para canal de *downlink* de dados de telemetria e rastreamento de estações terrenas TT&C em centros de controle de satélites.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão detalhados o objetivo geral e os específicos que nortearam o desenvolvimento deste trabalho.

Objetivos gerais

Estudar solução de mitigação de risco de interferência que ameaça a segurança de infraestrutura de comunicações via satélite, em camada física. Desenvolver técnica para prevenção de radiointerferência visando garantia da disponibilidade de sistema de telemetria, rastreo e comando (TT&C), elemento crítico em uma rede de satélite. O foco do trabalho será de avaliar, através de resultados de simulações, a interferência agregada, gerada por sistema 5G, sobre uma estação terrena TT&C, com uso de ferramenta que implementa metodologia da UIT, e seguindo preceitos do uso eficiente do espectro.

Objetivos específicos

Como objetivos específicos, o presente trabalho visa:

- avaliar, através de simulações, o estabelecimento de uma zona chamada de "Cinturão de Proteção TT&C" onde estações base 5G (IMT-2020) poderiam operar, com restrições de operação, compartilhando o espectro em bandas Q e V com uma estação terrena TT&C de rede de satélite.
- identificar configurações para melhoria no cenário de interferência agregada em função dos resultados de variação dos seguintes parâmetros de arranjo de antenas 5G: número de elementos (linhas e colunas), potência conduzida por elemento e ângulo de *downtilt*.
- obter valores objetivos (probabilísticos) do indicador de razão Interferência-Ruído (I/N) em termos percentuais de casos em que a interferência excede a relação de proteção adotada, para cada cenário avaliado.

1.3 PUBLICAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES

O estudo desenvolvido no presente trabalho fornece uma nova abordagem sobre como aumentar a proteção ao canal TT&C por meio da aplicação do conceito de Cinturão de Proteção e deu origem ao artigo "*Protecting Satellite Downlink Tracking and Telemetry Channels by IMT-2020 5G Base Stations Protection Belts Surrounding Satellite TTC Earth Stations Operating in the 40 GHz Band*" (10), apresentado pelo autor desta dissertação, em junho de 2020, durante a Conferência Europeia de Teste e Telemetria 2020 (ettc2020).

A ETTC (*European Test and Telemetry Conference*) é organizada pela Sociedade Europeia de Telemetria, sediada na Alemanha e, dentre outros, visa promover o intercâmbio de conhecimento nos campos de telemetria, instrumentação e telecontrole, bem como cooperar com órgãos de padronização. Na esfera acadêmica, visa coletar e estender conhecimento científico em suas áreas de atuação, bem como promover pesquisas em universidades e instituições relacionadas aos temas. O evento possui em seu escopo, apresentações de artigos científicos e demonstrações de equipamentos e aplicações profissionais de estado da arte

do mercado de telemetria. Usualmente é realizado em Nuremberg, Alemanha, porém a edição de 2020, devido à pandemia COVID-19, foi realizada totalmente online, por meio de plataforma virtual de palestras e stands. Sendo assim, o evento congrega ciência e aplicações profissionais de mercado em um mesmo ambiente.

Após a aprovação e apresentação em Conferência, o artigo foi publicado pela organização responsável no portal científico *Ama-science* (10), gerido pela Associação para Sensores e Medições (AMA), instituição que publica estudos do seu Comitê Científico, organiza Conferências e apoia a distribuição dos últimos resultados de pesquisas nos temas de abrangência da entidade. O artigo foi registrado (10) sob DOI 10.5162/ettc2020/7.4, ISBN 978-3-9819376-3-3.

O trabalho também gerou um método de trabalho para organização de parâmetros e resultados, com a criação de uma planilha de controle de simulações com uso da ferramenta SHARC (11), que poderá auxiliar outros estudos de convivência utilizando a mesma ferramenta no futuro.

Destaca-se também outra contribuição deste trabalho que remete a estudo de convivência do IMT-2020 em Redes Privativas com o FSS de 3,7 a 3,8 GHz (12), desenvolvido no âmbito da Anatel. As simulações aproveitaram aplicação prática de conceito de Cinturão de Proteção, desenvolvido na presente pesquisa, porém com enfoque em proteção de estação terrena profissional e avaliação de distâncias mínimas para estabelecimento de zona de exclusão.

Por fim, considerando o cenário real a ser vivenciado com a implantação do 5G no Brasil, e devido a existência de estação terrena TT&C de satélite operando em banda C (13), e em uso em centro de controle de satélite brasileiro, o presente trabalho reforça sua relevância por também contribuir com a apresentação de novas técnicas inovadoras, potencialmente aplicáveis para proteção de estação TT&C em caso real de grande relevância no país.

1.4 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O capítulo um introduz o tema central, apresenta informações sobre sistemas TT&C de redes de satélites e aborda os desafios e oportunidades ligados ao compartilhamento de espectro com 5G em bandas Q e V. Também indica os objetivos do trabalho e apresenta as contribuições e publicação resultante deste trabalho.

O capítulo dois apresenta fundamentação teórica e revisão bibliográfica sobre elementos de sistemas de comunicação e, em especial, do sistema 5G, com destaque para aspectos da rede de acesso rádio.

O capítulo três apresenta fundamentação teórica e revisão bibliográfica contextualizando aspectos da segurança cibernética no âmbito das redes de satélite, abordando os princípios de segurança da segurança da informação, com destaque para a questão da disponibilidade, e relacionando com o tema da dissertação. Neste capítulo, destaca-se revisão de trabalho anterior que serve de referência no tema.

O capítulo quatro apresenta fundamentação teórica e revisão bibliográfica na área de compartilhamento do espectro com destaque para revisão comparativa de estudos de convivência envolvendo proteção de serviços via satélite, abordando similaridades e diferenças em relação ao presente trabalho. Esta parte

do trabalho também explora os modelos de propagação e de canal adotados, explorando a forma como as referências foram aplicadas no trabalho em questão, bem como parâmetros e diagramas de antenas adotados na modelagem de simulação.

O capítulo cinco irá aprofundar a metodologia e os resultados do trabalho, elucidando o conceito de "Cinturão de Proteção TT&C", ponto central do estudo. Também são detalhados aspectos da modelagem adotada nas simulações, ressaltando os dados de entrada e resultados. Em relação a cada simulação é feita uma avaliação sobre o comportamento da interferência agregada na estação terrena TT&C. Por fim, o capítulo seis apresenta uma conclusão com base nos resultados obtidos, e indica áreas para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Este capítulo apresenta conceitos sobre sistemas de comunicação e referências bibliográficas que fundamentam o estudo na área de segurança cibernética. Com isso, busca-se construir uma base de conhecimento sobre o problema endereçado pelo presente estudo.

2.1 ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Para compreender o processo de comunicação é necessário visualizar os elementos que o compõem, de maneira individualizada, e endereçar conceitos como potência de sinal, largura de banda, fontes de informação, canais de comunicação e conceitos de uma maneira geral influenciam na segurança.

Uma das principais obras na área de comunicações, produzida por Haykin (1), conceitualiza a comunicação como uma sucessão de processos. Os processos incluem a geração da mensagem, que se trata da fonte da informação pura, sua conversão em símbolos e codificação para viabilizar a transmissão do sinal resultante pelo meio físico, seja ele ar ou meio confinado. Do lado do receptor, destino da informação, o sinal recebido é então decodificado e os símbolos originais são então reproduzidos. Por fim, ocorre o processo para reconstituição do sinal mensagem original, com uma degradação de qualidade natural e aceitável, causada por imperfeições do sistema.

Com o crescimento das comunicações entre máquinas, e mais especificamente com a Internet das Coisas, outros tipos de processos também podem ocorrer envolvendo aspectos de sinalização entre dispositivos que não envolvem fonte de informação no formato interpretável por humanos. No entanto, apesar das especificidades dos inúmeros sistemas de comunicação existentes, Haykin (1) reforça que existirão sempre 3 grandes blocos elementares : TRANSMISSOR, CANAL e RECEPTOR.

Os elementos básicos do sistema de comunicação são ilustrados na figura 2.1. De maneira geral, o transmissor e receptor estão separados espacialmente, e o canal é o meio físico que conecta ambos. O papel do transmissor é de converter o sinal mensagem para um formato adequado a sua transmissão pelo canal. Ao propagar, o sinal é distorcido pelas imperfeições do canal. Além disso, ruído e sinais interferentes gerados por outras fontes, são adicionados à saída do sinal, de maneira que o sinal recebido sempre será uma versão "alterada" do sinal transmitido.

Dentre os recursos principais para estabelecimento da comunicação (1), destacam-se a potência de transmissão e a largura de banda do canal. A potência de transmissão é a média da potência do sinal transmitido e a largura da banda do canal é a faixa de frequências alocadas para transmissão da mensagem.

Uma outra característica inerente a comunicação em ambiente real é a presença de ruído. O ruído se materializa pela presença de ondas indesejáveis que tendem a perturbar o processo de transmissão do sinal mensagem.

No caso de comunicação via satélite por exemplo, o sinal de *downlink* recebido de um satélite em órbita

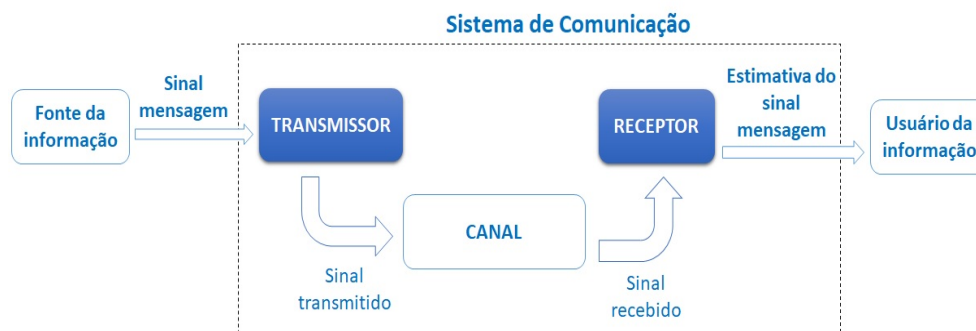


Figura 2.1: Elementos de um sistema de comunicação (adaptado de (1))

geoestacionária é extremamente fraco, devido à perda de propagação em espaço livre decorrente da larga distância do enlace, da ordem de 36.000 km. Com isso, para poder detectar o sinal com qualidade razoável ao estabelecimento de comunicação, o sistema deve manter um nível de ruído abaixo do sinal recebido. O ruído é introduzido no sistema de recepção por diferentes fontes, podendo ser internas ou externas ao sistema. Uma forma de quantificar o efeito do ruído no sistema é através da definição de um parâmetro de sistema chamado de razão (ou relação) sinal-ruído (SNR). O parâmetro SNR representa a razão entre a potência média do sinal pela potência média do ruído, em decibéis (dB). Neste contexto utiliza-se o conceito de potência de ruído do sistema, que varia de acordo com a temperatura de ruído do sistema, conforme a seguinte expressão (14):

$$N = k * T * B \quad W \quad (2.1)$$

Onde :

k é a constante de *Boltzmann*, $1,39 \times 10^{-23} (J/K)$

T é a temperatura de ruído do sistema (K)

B é a largura de banda de operação (Hz).

Um exemplo da importância da quantificação do ruído, e especificamente do parâmetro SNR, para o estabelecimento da comunicação é retratado pelo teorema de *Shannon* da capacidade do canal, que estabelece uma relação direta entre a capacidade máxima de dados do canal (C), em bits por segundo, como função da largura de banda (B) e de SNR (14), conforme abaixo:

$$C = B * \log_2(1 + SNR) \quad b/s \quad (2.2)$$

Em uma análise mais aprofundada do teorema, é possível considerar também a existência de interferência externa no cálculo da capacidade do canal, somado ao ruído, conforme aplicado em estudos anteriores na área de convivência entre serviços de radiocomunicação (15). Com isso, na mesma equação de capacidade, substitui-se o termo SNR por SINR (relação sinal-interferência mais ruído), que soma ao denominador do SNR, o valor da potência de interferência oriunda de fonte(s) externa(s).

A transmissão por uma rede se materializa na camada física através de um canal de comunicação, que pode ser estabelecido por um meio confinado (ex: linha de cobre e fibra ótica), ou não confinado (ex: canal

de rádio móvel e satélite). Por se tratar de um trabalho na área de radiocomunicação, serão abordados apenas aspectos de canal relativo a meio físico "não confinado", ou seja, baseado em propagação "livre".

De maneira geral, o canal sem fio se estabelece basicamente para suportar praticamente todos os tipos de serviços e aplicações também estabelecidos em meios confinados, porém fazendo uso de técnicas de modulação e antenas (de transmissão e recepção) que convertem sinais da fonte modulados, em ondas eletromagnéticas que propagam em espaço livre (vice-versa). A antena é projetada de maneira a permitir a irradiação e recepção dos sinais de maneira mais eficiente possível. No caso do canal móvel, especificamente, significa que as estações terminais têm a habilidade de se mover durante a comunicação, e portanto sofrem de outros efeitos de impactos decorrentes de obstáculos, e portanto a ausência de linha de visada (LOS), devido a edificações e outras estruturas de obstáculos físicos a propagação do sinal. A existência destes obstáculos, que também podem se mover ao longo do tempo, bem como mecanismos de propagação como a difração, faz com que o sinal seja recebido no receptor por diversos percursos diferentes. A intensidade do sinal recebido varia de maneira complexa em um canal móvel, sendo assim um canal variante no tempo de natureza estatística.

Em relação a comunicação via satélite, trata-se de um sistema que opera em canal com extensa área de cobertura, alto grau de confiabilidade, sendo muitas vezes utilizado como redundância, ou como o único sistema de comunicação banda larga em área remota. Em se tratando de satélite geoestacionário, devido à característica de órbita geossíncrona, as antenas das estações terrenas permanecem fixas, simplificando o enlace e, portanto, os mecanismos de propagação são usualmente menos complexos do que aqueles do canal móvel. No caso de sistemas não geoestacionários, aumenta-se a complexidade devido à movimentação da estação espacial em relação à estação terrena.

Em suma, o canal de comunicação é elemento central da operação do sistema de radiocomunicação e, no estudo de compartilhamento de espectro, ele será fundamental para descrever o comportamento do sinal interferente, sendo suas características determinantes para a capacidade e qualidade do serviço.

2.2 SISTEMA MÓVEL 5G (IMT-2020)

Atualmente as redes de comunicações móveis atravessam um momento de transição tecnológica da 4ª geração (4G) para a 5ª geração (5G). Com a implantação das redes 5G ao longo dos próximos anos, diversas novas aplicações surgirão como decorrência das possibilidades abertas pela enorme capacidade que as novas redes móveis terão. De acordo com a UIT, o papel do 5G será fundamental na sociedade como um todo. Ele irá transformar a indústria, bem como nos diversos setores do dia a dia, como a medicina, transporte e educação. Surgirão novos mercados de tecnologias exponenciais de informação e comunicação com aplicações de *big data*, inteligência artificial, internet das coisas (IoT) dentre outras inovações que requerem capacidades de rede hoje não alcançáveis pelo 4G. O sistema 5G será de capacidade e velocidade ultra altas, com novos requisitos de desenvolvimento alinhados à eficiência energética.

Conforme apresentado na seção 1.1, os requisitos para redes móveis de 5ª geração são padronizados, no âmbito da UIT, por meio de recomendações IMT-2020. A recomendação ITU-R M.2083 define a estrutura e objetivos gerais de desenvolvimento do padrão IMT-2020, referente às tecnologias móveis 5G, assim como a recomendação ITU-R M.1645 (16) definiu de maneira geral os objetivos de performance para o padrão IMT-*Advanced*, aplicáveis às tecnologias móveis 4G. Os cenários de uso vislumbrados para o padrão IMT-2020 são agrupados em 3 vertentes principais, conforme ilustrado na figura 1.1 da seção 1.1:

– Banda larga móvel aprimorada (eMBB): a demanda por banda larga móvel continua crescendo. Este cenário de uso irá ocorrer com o surgimento de novas aplicações e experiências de usuário tecnicamente superiores ao que ocorre com a banda larga móvel atual. Este cenário inclui redes com estações com coberturas em áreas extensas e *hotspots*. No caso de *hotspots*, em áreas de alta densidade de usuários, será necessária alta capacidade de tráfego, enquanto que o requisito por mobilidade seria menor e taxa de dados por usuário maior do que cobertura em área extensa. Para cobertura de áreas extensas, cobertura e mobilidade passam a ser mais desejáveis, com grande melhoria em relação a taxa de usuários atualmente disponível, apesar de mais relaxada em relação ao cenário com *hotspot*.

– Comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC): Este caso de uso possui requisitos muito rigorosos em relação à vazão de dados, latência e disponibilidade. Alguns exemplos incluem sistemas de controle de fabricação industrial ou processos de produção, cirurgia médica remota, automação de distribuição de energia em *Smart Grid*, segurança de transporte, dentre outros.

- Comunicações massivas de máquinas (mMTC): Este caso de uso é caracterizado por uma quantidade muito grande de dispositivos conectados, tipicamente, transmitindo baixo volume de dados não sensíveis a atraso. Estes dispositivos tendem a ser de baixo custo e a ter uma bateria com capacidade de carga muito longa. Casos de uso adicionais são esperados, os quais não são previsíveis hoje. O IMT futuro irá incluir um grande número de diferentes funcionalidades. Dependendo das circunstâncias em diferentes países, futuros sistemas IMT deverão ser projetados de maneira modular, não sendo necessário que todas as funcionalidades devam ser implementadas em todas as redes.

Uma grande variedade de capacidades é esperada no ambiente 5G. Dentre os objetivos técnicos, os seguintes parâmetros têm metas de aprimoramento pelo 5G (IMT-2020) em relação ao 4G (IMT-*Advanced*): taxa de dados em pico, taxa de dados experimentada pelo usuário, latência, mobilidade, densidade de conexões, eficiência energética, eficiência espectral e capacidade de tráfego de área. Tais metas são sumarizados

Aprimoramento de capacidades chave do IMT-2020 em relação ao *IMT-Advanced*

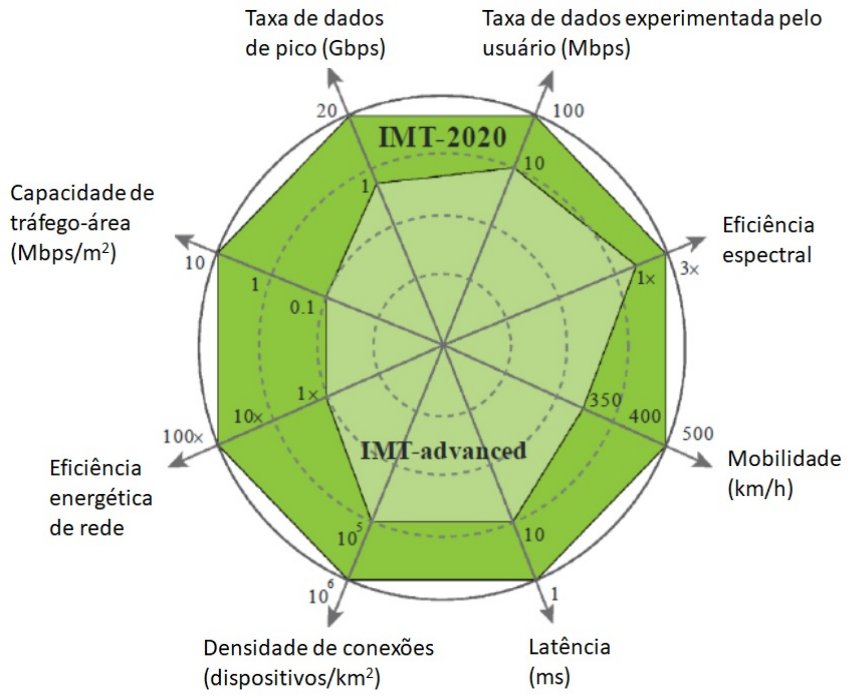


Figura 2.2: Aprimoramentos do 5G em relação ao 4G (fonte: Rec. ITU-R M.2083)

na figura 2.2.

Os requisitos técnicos do IMT-2020 demandarão enormes quantidades de recursos de espectro para uso pelas redes 5G. Novas tecnologias contempladas pelo ecossistema 5G incluem novas técnicas de modulação e esquemas de múltiplo acesso que aumentam, de maneira substancial, a eficiência espectral. Associado a isso, surgem novos esquemas de antenas avançadas aplicando técnicas de conformação de feixe, MIMO (*multiple input multiple output*) massivo.

Para habilitar a enormidade de novos casos de uso e aplicações, e a fim de endereçar o rápido crescimento de tráfego, são necessários maiores canais com largura de banda contígua. Isso indica a necessidade de considerar faixas mais altas do espectro. Neste sentido, a Conferência Mundial de Radiocomunicações 2019 da UIT (WRC-19) identificou 17,25 GHz de espectro em ondas milimétricas para uso pelo IMT. As faixas recém identificadas são 24,25-27,5 GHz, 37-43,5 GHz, 45,5-47 GHz, 47,2-48,2 GHz e 66-71 GHz.

2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE REDE DE ACESSO RÁDIO 5G UTILIZADOS

Esta seção apresenta conceitos sobre modelagem de rede de acesso radio IMT-2020 relevantes ao presente trabalho.

Assim como nas gerações anteriores de tecnologias de comunicações móveis, as redes 5G preveem comunicação "ponto-multi ponto" estabelecida entre a figura da estação radio base e os terminais de usuários que estão, sob sua área de cobertura, acessando aplicações 5G através de seus recursos de radio.

Conforme recomendação da UIT (17), os cenários de implantação esperados para o IMT-2020 podem ser classificados em função da localização da estação móvel (*Indoor* ou *Outdoor*), bem como quanto à área de cobertura da rede de acesso rádio, por meio de macro células, ou micro células (ex: *hotspots*). É previsto que as topologias de macro células utilizem faixas de frequência mais baixas do espectro, enquanto que *hotspots* utilizem faixas em ondas milimétricas, na maioria dos casos. Além disso, espera-se implantação em diferentes ambientes (Rural, Suburbano, Urbano e *Indoor*) os quais irão influenciar diretamente nas diferentes possíveis modelagens esperadas.

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 consignados à estação móvel, e que são subdivididos em "blocos de recurso (RB)" (*Resource Blocks*), de aproximadamente 180 kHz, alocados dinamicamente aos terminais acampados na estação radio base. Cabe ressaltar que esta alocação é feita através de um processo chamado de "agendamento" de recursos (*scheduling*), 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. Para o *downlink*, a Potência equivalente isotropicamente irradiada (EIRP) adotada irá depender do tipo de estação radio base (ex: macro ou micro célula) implantada, sem a adoção de mecanismo de controle de potência para este enlace.

Em redes móveis reais, as estações não operam 100% do tempo com 100% dos blocos de recursos de transmissão alocados, ainda mais em redes que aplicam duplexação por divisão de tempo (TDD), como as redes 5G. As estações usualmente operam apenas com parte dos recursos na maior parte do tempo. Com base nisso, é necessário observar este parâmetro, também chamado de probabilidade (ou fator) de carga, usualmente considerada ao redor de 50%.

Em termos de sistemas de antena, o 5G prevê a adoção de novas tecnologias de antena inteligente para otimizar o uso do espectro. A principal componente deste processo são as antenas MIMO (*multiple input multiple output*). Com múltiplos elementos de antena em ambos os lados da comunicação (terminal e estação base), amplia-se a capacidade da rede com a possibilidade de estabelecimento de múltiplos fluxos de sinais, através de técnicas de conformação de feixes (*beamforming*) para transmitir em diversidade, multiplexação espacial ou direcionamento de nulos de maneira a prevenir interferências. Este assunto será abordado com mais informações na seção 4.3.

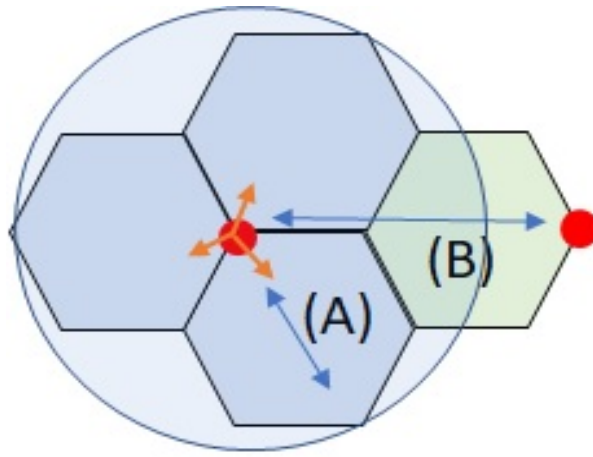


Figura 2.3: Geometria de macro célula

Quanto à topologia de rede, existem abordagens homogêneas ou heterogêneas. As redes heterogêneas consideram a existência de diferentes tipos de estação radio base (macro e micro) na mesma topologia. No caso da modelagem de topologia de rede homogênea, considera-se apenas um tipo (ex: *hotspots*).

As estações radio base de macro célula são usualmente implantadas acima do nível de telhados, e formadas pela geometria clássica de três setores, ilustrada pelos parâmetros de raio da célula (A) e distância entre os sítios (B) da figura 2.3 adaptada de (17). O tamanho da célula em redes IMT pode variar consideravelmente, em função de fatores como ambiente, frequência de operação e tipo de estação radio base.

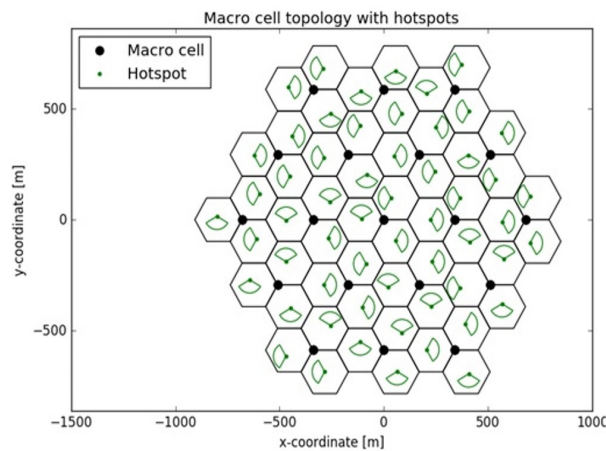


Figura 2.4: macro célula e *hotspot*

Layout macro celular (*Cluster*)

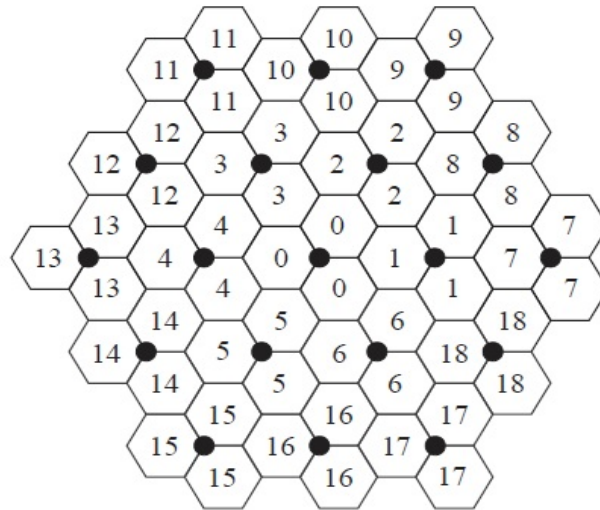


Figura 2.5: Agrupamento de macro células (*cluster*)

A fim de estudar a operação da rede considerando uma área de abrangência mais ampla, as células são agrupadas, formando um *cluster*. Usualmente adota-se estrutura de dezenove sítios (contendo três setores cada sítio), conforme figura 2.5. No cenário de implantação de micro células, com a ferramenta apresentada por Edgar et al. (18) os *hotspots* são distribuídos uniformemente, posicionados de forma aleatória nas células. Os terminais de usuário são distribuídos dentro da área de cobertura do *hotspot* seguindo distribuição *Rayleigh* para distância entre terminal e estação rádio base, e distribuição Normal para o azimute entre ambos, conforme apresentado em 2.4. Os detalhes sobre os parâmetros adotados no presente estudo, para ambas distribuições, são apresentados na seção 5.4. A interferência agregada gerada por um *cluster* IMT irá variar em função dos elementos apresentados nesta seção, principalmente da densidade de estações *hotspots* IMT, dos parâmetros de RF e distâncias entre macro sítios IMT.

Em cenários de implantação em outros tipos de ambiente (ex:*Indoor*) outros formatos de reticulados (*grid*) são esperados.

3 SEGURANÇA CIBERNÉTICA EM REDES DE SATÉLITES

Este capítulo apresenta, de maneira geral, e resumidamente, diferentes riscos que afetam a segurança cibernética de redes de satélites, visando contextualizar o tema deste trabalho como pesquisa para proteção de canal crítico de comunicação de TT&C, na vertente de disponibilidade, e no rol ameaças de incidentes "não intencionais" gerados por radio interferências prejudiciais.

Em comparação com outras tecnologias de redes de comunicação, são poucos os casos de grande repercussão em que graves problemas de segurança cibernética afetaram redes satelitais, com algo grau de criticidade. Pode-se dizer que a segurança cibernética em comunicações via satélite envolve todas as questões relacionadas a vulnerabilidades da infraestrutura "espacial", desde o terminal do usuário final, passando pelos sistemas de antenas até o satélite e seu controle e monitoração, a infraestrutura em solo das estações que concentram o tráfego de vários usuários em plataformas *gateways*, até o outro usuário da rede de satélite em uma comunicação ponto a ponto. Portanto, toda a complexidade de equipamentos e sistemas envolvidos nesta rede, desde a camada física de radiofrequência (RF) até as aplicações, também devem ser situados no processo de segurança cibernética.

Alguns fatores como a redução do custo de lançamento e fabricação, associados à redução no tamanho de satélites, e a crescente integração das redes de satélites com a internet têm contribuído para o aumento da importância desta tecnologia para a humanidade. Um forte catalisador deste processo é o crescimento do uso de satélite, principalmente como meio para acesso banda larga residencial à internet. O satélite tem se mostrado cada vez mais como uma forma acessível e ubíqua devido às largas coberturas possíveis. No entanto, estas mesmas características também colocam o satélite em risco. As estações terrenas de usuários normalmente estão distribuídas em áreas geográficas extensas, suscetíveis a riscos incluindo inúmeras possíveis fontes de interferência, totalmente fora do controle do operador de satélite.

A crescente integração com o mundo da internet torna as redes satelitais sujeitas a todo tipo de ataque, tanto em nível de usuário final, quanto em nível de controle da estação espacial, oferecendo riscos ainda maiores para o sistema. Um outro aspecto que desfavorece o satélite nesta questão é o fato de ser uma tecnologia de operação de médio e longo prazo. Um satélite geoestacionário, por exemplo, é projetado para seguir operando continuamente, sem intervenções físicas, por mais de 15 anos. A tecnologia embarcada praticamente não se modifica ao longo do tempo. Como não é possível atualizar sua tecnologia para ampliar a segurança, o satélite se encontra em situação de maior vulnerabilidade frente a novas tecnologias de ataque cibernético que surgem ao longo do tempo. Com isso, a principal ferramenta que o setor satelital possui é a possibilidade de monitorar as ameaças em camada física, por meio de estações de radio monitoração do espectro dos enlaces de subida (*uplink*) e descida do satélite (*downlink*), bem como utilizar plataformas de monitoração em outras camadas lógicas e de serviço com maior foco em infraestruturas críticas dos usuários, tais como as estações *gateways*, e/ou enlaces usados para o transporte de tráfego que as interligam. Com isso, operadoras podem buscar responder de maneira mais ágil a possíveis incidentes, sejam eles intencionais ou não intencionais, utilizando protocolos bem definidos, em cada vertente, e, caso

necessário, também contando com rápida cooperação com entidades parceiras, sejam elas na esfera pública ou privada.

Este capítulo busca fundamentar a temática da segurança cibernética em redes de satélites, tendo em vista o enfoque maior dado pelo presente estudo à questão da prevenção contra radio interferências, mais especificamente à convivência de serviço crítico via satélite compartilhando espectro com outro serviço terrestre de radiocomunicação. Além disso, apresenta inovações trazidas pelo presente trabalho em relação a estudos anteriores.

A revisão bibliográfica permeou referências teóricas e científicas, nas áreas de segurança de cibernética apresentadas neste capítulo, e de gestão do espectro, e mais especificamente em trabalhos sobre convivência entre serviços de radiocomunicação a serem aprofundados no capítulo 4.

3.1 PRINCÍPIOS DA SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO

A fim de formar uma base técnica de conhecimento quanto a aplicação dos princípios da segurança da informação ao setor de satélites, além de artigos científicos, buscou-se normas e regulamentações aplicáveis, tais como ISO 31000 que trata de diretrizes para gestão de riscos (19), regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), Resolução nº 656/2015 sobre Segurança de Infraestruturas Críticas de Telecomunicações (5) e normatizações do Gabinete de Segurança Institucional (GSI) (20). Outras fontes relevante são informações do próprio mercado de satélites, em notícias sobre casos de incidentes de grande repercussão (21) (22), bem como entidades especializadas do setor de satélites (23) (24) (25) (26) (27).

A bibliografia define três princípios fundamentais da segurança da informação: a Disponibilidade, a Confidencialidade e a Integridade. O trabalho de Wang et al. (28) aprofundou riscos a esses princípios com um olhar mais detalhado sobre os aqueles relativos a radiointerferência em redes de satélites. Na seção 3.2, a relação do trabalho de Wang com o presente trabalho será aprofundada.

Em 2015 a Anatel aprovou o Regulamento sobre Gestão de Risco das Redes de Telecomunicações e Uso de Serviços de Telecomunicações em Desastres, Situações de Emergência e Estado de Calamidade Pública (5), que aplica conceitos de gestão de riscos para o setor de telecomunicações. O regulamento também define o que são infraestruturas críticas de telecomunicações, conforme já mencionado em 1.1. Com relação aos conceitos da segurança da informação, estes são definidos pelo Departamento de Segurança da Informação (20) do Gabinete de Segurança Institucional (GSI), órgão vinculado à Presidência da República, conforme abaixo:

Disponibilidade : "propriedade de que a informação esteja acessível e utilizável sob demanda por uma pessoa física ou determinado sistema, órgão ou entidade".

Integridade : "propriedade de que a informação não foi modificada ou destruída de maneira não autorizada ou acidental".

Confidencialidade : "propriedade de que a informação não esteja disponível ou revelada a pessoa física, sistema, órgão ou entidade não autorizado e credenciado".

A seguir, os três pilares serão explorados com a apresentação de alguns exemplos e casos concretos de repercussão ligados a infraestrutura de redes de satélites.

3.2 RADIOINTERFERÊNCIA E INCIDENTES DE INDISPONIBILIDADE EM SATÉLITES

O princípio da disponibilidade prevê que os serviços de comunicação estejam operacionais aos terminais de estações terrenas de usuários, permitindo acesso, a qualquer momento, à rede de satélite, conforme previsto em projeto. Ataques cibernéticos intencionais, tipo negação de serviço, podem afetar gravemente a disponibilidade. Entretanto, outros fatores "não intencionais" são responsáveis por grande parte dos eventos de indisponibilidade, dentre os quais, a degradação de qualidade ou até bloqueios de serviço por radio interferência prejudicial.

A segurança nas comunicações por radiofrequência é essencial em sistemas de satélite. Ondas eletromagnéticas são utilizadas para que o satélite possa receber comandos das estações terrenas TT&C de controle, conforme visto na figura 1.2 por meio de enlace de subida, e retransmitir à mesma estação terrena suas informações de condição de operação por meio do enlace de descida. Satélites também fazem uso de ondas eletromagnéticas para transmitir sinais de televisão, dados científicos, comunicações de voz, dados de internet dentre outros.

A fim de contextualizar a temática da segurança cibernética quanto aos riscos de radiointerferência em redes de satélites, buscou-se trabalhos anteriores que explorassem o tema, porém verificou-se que esta é uma área ainda pouco explorada no universo acadêmico, havendo escassa produção científica específica. Wang et al. (28) explorou muito bem a relação entre redes de satélites e a segurança cibernética através dos impactos da radiointerferência, com visão didática. O estudo avalia o desempenho de uma estrutura de sistemas de satélites multi camadas, considerando roteamento em múltiplas rotas, fazendo uso de enlaces entre satélites em diferentes tipos de orbita, além de codificação de canal para aumentar a segurança e robustez contra radiointerferências. Wang apresenta os tipos de radiointerferência que afetam sistemas satelitais, categorizando-as em dois grupos, interferências "intencionais" e "não intencionais". A figura 3.1 apresenta um diagrama que relaciona o pilar da segurança cibernética afetado nesses casos, que é a "disponibilidade", com o tipo de ameaça de interferência conforme a motivação e a fonte (ou técnica) de geração da interferência. Em seguida, cada tipo é apresentado.

Dentre as fontes não intencionais, há três subdivisões: (1) falhas de funcionamento e operação, (2) canal de propagação, incluindo fontes naturais geradas por tempestades solares e clima espacial e (3) fontes externas oriundas de sistemas de radiocomunicação (regulares), tais como satélites adjacentes ou sistemas terrestres, operando na mesma faixa de frequência (cocanal), ou até mesmo em faixas adjacentes.

Interferência por fonte não intencional

Em relação aos riscos à disponibilidade de infraestrutura de satélites devido à interferência não intencional gerada por outros sistemas regulares, isso pode ocorrer por interferências originadas por outros satélites ou sistemas terrestres. A causa pode estar relacionada a problemas de coordenação prévia de uso da radiofrequência, falha em processos de coordenação em zonas de fronteira, ou até por ausência de



Figura 3.1: Classificação de interferências em satélites

um arcabouço regulatório que previna a interferência de vir a ocorrer, por exemplo. Tais situações podem ocorrer quando dois operadores estão regularmente autorizados a operar, porém não realizaram a devida coordenação entre si, principalmente em casos de operação na mesma faixa de frequência. Tradicionalmente, este tipo de situação pode ser minimizada por meio de processos regulatórios que prevejam parâmetros de operações "conservadores", *ex-ante*, de maneira a limitar as operações e minimizar este tipo de interferência. No entanto, isto em muitas situações poderá gerar uso ineficiente dos recursos de espectro e órbita. Outra solução seria exigir a confirmação de realização de coordenação técnica de uso do espectro com outros sistemas regulares, como requisito prévio para autorizar o início da operação de uma nova estação. Esta coordenação pode ser materializada através da formalização de acordos bilaterais entre os operadores (satélite e terrestre) no qual são descritos os parâmetros técnicos de operação acordados entre as partes. Adicionalmente aos exemplos apresentados por Wang et al (28), é possível indicar o processo regulatório internacional gerido no âmbito da UIT, que estabelece regras e procedimentos de coordenação prévia de redes de satélites, respaldadas pelo RR da UIT (7), instrumento com nível de tratado internacional. Ainda assim, este risco pode aumentar quando surgem novas tecnologia que lidam de maneira distinta com o espectro, como é o caso cenário das grandes constelações não geostacionárias, materializada por novos projetos com milhares de satélites para banda larga de empresas como a SpaceX (29) e Amazon (30).

À medida que aumenta a quantidade de operadores e satélites compartilhando recursos de espectro e órbita em nível global, torna-se fundamental a evolução do arcabouço regulatório, e a aplicação de novas

técnicas de coordenação cada vez mais refinadas para que sistemas regulares não interfiram entre si, ao mesmo tempo que fazem uso mais eficiente possível de tais recursos. Um exemplo importante é o caso da regulamentação de espectro para satélites em bandas Q e V por exemplo. O Regulamento de Radiocomunicações da UIT (7) foi atualizado em 2019 com a aprovação de duas novas resoluções que tratam da proteção de satélites geoestacionários de interferência (agregada e individual) gerada pelas múltiplas redes de satélites não geoestacionários em tais bandas (31) e (32), prevenindo impactos negativos à disponibilidade de redes já em operação. Neste sentido, foram definidos critérios para limitar o nível de interferência que uma nova rede não geoestacionária nestas bandas de frequência poderia gerar individualmente, ou no cômputo da interferência agregada, em conjunto com outras redes operando, concomitantemente, na mesma faixa de frequência, pois a cada novo satélite entrando em operação este agregado tende a aumentar. Com isso, definiu-se um sofisticado mecanismo de coordenação, que prevê cálculos complexos de parâmetros como densidade de fluxo de potência equivalente (*epfd*) razão portadora-ruído (*C/N*) e eficiência espectral para avaliação de impactos e visando minimizar riscos à disponibilidade de satélites geoestacionários, além de reuniões de consulta entre operadores e administrações, onde são realizados, de tempos em tempos, recálculos dessa interferência agregada. Este é um exemplo de solução avançada de coordenação para prevenção de interferência que requer maiores capacidades e engajamento técnico de todos os envolvidos, bem como ferramentas de softwares de suporte ao planejamento, maximizando a eficiência no uso dos recursos de espectro e órbita, e garantindo a segurança por meio de operações livres de interferência.

Destaca-se que o presente trabalho se concentra no tipo de interferência em satélite indicada por Wang et al. (28) como sendo de fonte não intencional, gerada por outro sistema terrestre regular, neste caso o IMT-2020 (5G). A diferença em relação à solução proposta por Wang será na forma de atacar o problema. Wang propõe um sistema de satélites multicamadas, que faz uso de técnica de roteamento de tráfego associado ao uso de maior robustez na codificação de canal para superar incidentes de interferência. Já o presente estudo trata de uma solução de coordenação e convivência, para prevenção de interferência agregada em canal de recepção de estação terrena TT&C operando em frequências de banda Q/V. Portanto, será abordada a vertente da segurança voltada à mitigação de radio interferência, também apontada por Wang como alternativa de solução para minimizar riscos à segurança cibernética por este tipo de radiointerferência (não intencional) a redes de satélite. Esta é a principal diferença entre os dois trabalhos.

Interferência por fonte intencional

O segundo grupo de radiointerferências identificado por Wang et al (28) em seu trabalho refere-se àquelas geradas por fontes intencionais, subdivididas em três tipos principais, (1) Bloqueador de sinais (*jammer*), (2) Retransmissão (*meaconing*) e (3) Falsificação (*spoofing*).

No caso do bloqueador de sinais de satélites *jammer*, o sinal interferente gerado pelo atacante não tem conteúdo, apenas potência suficiente e características para bloquear o receptor impedindo o rastreamento da fonte interferente na área de cobertura. Casos mais graves de indisponibilidade causados por sistemas interferidores (*jammers*), afetando o sinal de *uplink* ou de *downlink*, são as causas de ataques mais comuns. Estes resultam em indisponibilidade de sistemas via satélite, principalmente na recepção de sinal de Sistema de Posicionamento Global (GPS) em solo, afetando inúmeras aplicações em diferentes níveis de impacto. Um caso de alta repercussão se deu com o ataque de interferência em satélite usado para transmissão da Copa do Mundo de Futebol 2010, na África do Sul. O incidente de segurança em camada

física, relacionado a indisponibilidade e noticiado na mídia internacional, teria sido gerado intencionalmente por sistemas interferidores ("*jammers*") durante alguns jogos da competição. As ocorrências impactaram transmissões via satélite da emissora de TV *Al Jazeera* que transmitia o evento a países da África e Oriente Médio. Este tipo de ataque é de alta complexidade para se identificar a fonte, pois o transmissor interferente pode estar localizado fisicamente em qualquer ponto dentro da pegada de cobertura de subida do satélite, sendo necessário aplicar técnicas de geolocalização para estimar uma elipse de possíveis áreas de localização da estação transmissora geradora do ataque. Segundo notícias (33) (34) (35), a emissora contou com apoio de uma empresa especializada que teria geolocalizado a estação interferente em região da Jordânia, e a possível causa para o ataque teria sido uma motivação político-diplomática. Apesar de extremamente raros, devido às características técnicas de redes de satélites, os sistemas de TV possuem alta vulnerabilidade a este tipo de ataque.

Em relação à técnica de interferência por "falsificação", o interferente satura o receptor do satélite sem ele perceber, por meio de um sinal potencialmente interpretado como sinal legítimo.

O tipo "retransmissão"(ou *meaconing*) é a interferência causada por um sinal com as mesmas características do sinal desejado, porém com uma potência muito mais alta e um certo atraso, saturando o *transponder* do satélite. Por ter as mesmas características, como uma espécie de retransmissão do próprio sinal na mesma frequência, o interferido tende a confundir e demorar para perceber que se trata de uma interferência intencional, gerando mais dificuldades para identificar o ofensor.

Ocorrências de segurança cibernética de natureza não intencional devido a radiointerferência, que afeta a disponibilidade da infraestrutura crítica de satélites, também podem ocorrer em decorrência de uma catástrofe natural, tais como furacões ou mesmo fortes ventanias, que fazem com que as estações terrenas comunicando com o satélite percam o apontamento com o satélite desejado, e passem a gerar interferência a outros satélites adjacentes operando em mesma frequência.

Como já foi citado, existem mecanismos internacionais e nacionais para regular o uso do espectro eletromagnético, que definem a atribuição e regras para consignação e operação de radiofrequências aos serviços, de maneira que possam se desenvolver fazendo um uso mais eficiente do espectro, e operando livres de interferências prejudiciais. Em termos regulatórios nacionais, as fontes interferentes capazes de gerar indisponibilidade estariam classificadas pela regulamentação nacional como interferências prejudiciais, e cuja definição no Brasil é dada pela Anatel através do Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências, Resolução nº671de3denovembrode2016(36), *conforme abaixo*.

"XIX - interferência prejudicial: qualquer emissão, radiação ou indução que obstrua, degrade, interrompa repetidamente ou possa vir a comprometer a qualidade da comunicação."

Em termos de normas e padrões voluntários, vale mencionar o arcabouço da Organização Internacional de Normalização (ISO), internalizado pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 31000 (19), e que trata de diretrizes para gestão de risco, e dentre os controles de segurança da informação define um controle voltado para radio interferências, replicado abaixo:

"Controle de Segurança da Informação:

11.2 Equipamentos

11.2.1 Localização e Proteção do equipamento

Controle : Convém que os equipamentos sejam protegidos e colocados em locais para reduzir os riscos de ameaças e perigos do meio ambiente, bem como as oportunidades de acesso não autorizado.

Diretrizes: convém que sejam adotados controles para minimizar o risco de ameaças físicas potenciais e ambientais como furto, incêndio, explosivos, fumaça, água (ou falha do suprimento de água), poeira, vibração, efeitos químicos, interferência com o suprimento de energia elétrica, interferência com as comunicações, radiação eletromagnética e vandalismo."

Entretanto, essa norma ISO não se aprofunda nos métodos técnicos para que o controle previna interferências, sendo assim muito genérica.

3.3 OUTROS RISCOS À SEGURANÇA (INTEGRIDADE E CONFIDENCIALIDADE)

Embora não seja o foco deste estudo, cabe comentar que o pilar da integridade inclui questões como a proteção de dados de ataques de modificação, apagamento e/ou inserção de dados. Caso a estação em solo tenha sua segurança comprometida, ofensores podem manipular informações e também gerar indisponibilidade nos sistemas. Quanto ao pilar da confidencialidade, no ambiente das comunicações via satélite, refere-se a manter a informação protegida, prevenindo o acesso apenas aos entes autorizados, pela característica de difusão de sinal de radiofrequência em um ambiente com vasta extensão geográfica, cujo controle de acesso físico ao sinal da rede é impossível. Uma das técnicas mais fundamentais para mitigar esse tipo de risco, é a criptografia de sinais de satélite. Porém, técnicas de controle de acesso, monitoração e resposta também são ações importante a serem implementadas.

Uma ocorrência de segurança mais recente, e de alta repercussão na indústria de satélite, foi um caso de fevereiro de 2020, quando o FBI (Escritório Federal de Investigações dos Estados Unidos) emitiu uma notificação à indústria (37) em que identificou graves vulnerabilidade em sistemas VSATs (*Very Small Aperture Terminals*) instaladas em sistemas marítimos e aeronáuticos, que permitem comunicação banda larga por meio de pequenas antenas. Com dispositivos de baixíssimo custo, em torno de 400 dólares, o FBI identificou que seria possível criar um sistema criminoso que seria capaz de comprometer a segurança dos dados de tais sistemas por meio de processos de captura de dados ou de ataque de "homem no meio" (*man in the middle*), ferindo os pilares da confidencialidade e integridade.

Em termos das diversas possíveis ocorrências de incidentes de segurança por causas "intencionais", e especialmente durante o ano de 2020, em decorrência da Pandemia global do Coronavírus COVID-19, a humanidade recorre como nunca ao uso de redes de telecomunicações. Devido ao isolamento social, o acesso realizado a redes corporativas, ou de sistemas de gerenciamento e operação, com uso de terminais instalados em redes domésticas, naturalmente mais vulneráveis, tende a potencializar e aumentar riscos de segurança (27). Estes riscos também tendem a ocorrer em redes de satélites, caso não sejam adotados os cuidados pelos operadores dos sistemas envolvidos. Operadores de satélites têm investido na segurança em núcleo de rede (27), bem como na segurança fim a fim de clientes que contratam sua capacidade. Um dos temas mais sensíveis apontados pelo mercado (27) é o crescimento, e alto grau de sofisticação, de ataques a redes de satélites com motivações políticas.

Cabe lembrar que, devido à possibilidade de atender a operações de missão crítica em regiões onde

nenhuma outra infraestrutura atende, muitas vezes fornecendo capacidade a governos e organizações militares, o satélite se apresenta como alvo potencial muito relevante a todo tipo de ataque, incluindo os três pilares de segurança de informação mencionados. Neste sentido, além das iniciativas de mitigação na área tecnológica, operadoras de satélites também desenvolvem cooperação intra setor privado, bem como junto a órgãos do Estado inclusive para avaliar ameaças originadas em nações potencialmente inimigas.

Apesar de ser um tema de altíssima relevância, o foco deste trabalho será apenas no pilar de disponibilidade relacionada a radiointerferência não intencional, com foco na proteção de canal de comunicação crítico TT&C em sistema via satélite contra riscos de interrupções decorrentes deste tipo de interferência. Mais detalhes sobre as diversas iniciativas nesta área da segurança cibernética em redes de satélites, bem como ações de cooperação nessa área podem ser identificadas junto a organizações como *Secure World Foundation* (23), *Global Vsat Forum (GVF)* (24), *Space Information Sharing and Analysis Center (ISAC)* (26) e *Space Data Association (SDA)* (25).

4 COMPARTILHAMENTO DE ESPECTRO

Estudos de compartilhamento, e compatibilidade, no uso do espectro por diferentes sistemas de radiocomunicação evoluem fortemente na área de comunicações sem fio há anos, com relevante e crescente produção acadêmica. A título de exemplo, a partir de uma busca de artigos na base de dados do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) (38) pelo termo "*spectrum sharing*", verifica-se que entre 2010 e 2019 foram produzidos 3.753 artigos sobre o tema, enquanto que no período de 2000 a 2009 apenas 533, caracterizando um crescimento expressivo na última década. Entende-se que um dos motivos principais para o crescimento é a importância do espectro como recurso escasso e a necessidade de extrair o maior valor possível, econômico e social, a partir do seu uso mais eficiente pela maior quantidade de usuários. No cenário atual, o serviço móvel, em especial o 5G, vem se apresentando como o maior demandante de capacidade, e sua contribuição para as novas vertentes econômicas, associada à necessidade de se manter os demais serviços operando livres de interferência, apresenta-se como o motor propulsor deste processo de maior relevância aos processos de geração de conhecimento científico na área de gestão do espectro.

A produção acadêmica identificada nas referências deste trabalho conferiu conceitos técnicos de estado da arte, não apenas nas áreas de antenas e propagação, mas também em complexas metodologias de compartilhamento de espectro. As técnicas absorvidas permitiram explorar possíveis soluções para o problema identificado no presente trabalho. Dentre os estudos identificados, destacam-se recomendações e documentos submetidos à UIT no ciclo de estudos 2016-19, em preparação para a WRC-19. A importância desses trabalhos é reforçada pelo fato de que subsidiaram a identificação de faixas do espectro em ondas milimétricas para aplicações do IMT-2020 (5G) em escala global.

Este capítulo apresentará referências bibliográficas e indicará pontos comuns, e diferenças, em relação ao presente trabalho. Neste sentido, busca-se uma fundamentação sobre conceitos de compartilhamento do espectro como ferramenta para uso eficiente deste recurso e prevenção contra radiointerferência não intencional.

4.1 ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA E A PROTEÇÃO DE SERVIÇOS VIA SATÉLITE

Os principais trabalhos identificados na área de compartilhamento de espectro, voltados especificamente para a proteção de serviços via satélite contra radio interferências, são desenvolvidos no âmbito da UIT. Inicialmente, destaca-se a recomendação ITU-R M.2101 *Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies*, (17) que define a metodologia para realização de estudos de compartilhamento de espectro envolvendo serviços móveis IMT-2020, especificando como simulações devem endereçar os possíveis cenários de implantação de estações base em uma rede IMT-2020 (ex: *Indoor*, macro, micro, suburbano e urbano) dentre outros aspectos para modelagem de convivência, como controle de potência, antenas avançadas, altura de antena, densidade de distribuição, modelos de propagação, topologia de rede, modelagem da rede IMT para cálculos, algoritmo de simulação, imple-

mentação de conformação de feixe de antena (*beamforming*), determinação de interferência agregada e demonstração de resultados. A recomendação descreve detalhadamente os passos de simulação do enlace de transmissão das estações IMT, em especial do efeito agregado dessas emissões, sendo então importante que a modelagem da rede IMT seja feita de maneira realista para os diferentes cenários de estudos de compartilhamento e compatibilidade. Tais conceitos foram absorvidos por este trabalho na medida que foram implementados na ferramenta de simulação (11) utilizada para obtenção dos resultados, conforme aprofundado na seção 5.2. Entretanto, a principal diferença entre a metodologia ITU-R M.2101 e o presente trabalho diz respeito à modelagem geométrica da topologia de rede, usada para a distribuição das estações base no Cinturão de Proteção TT&C. A recomendação ITU-R M.2101 indica a topologia de distribuição das estações base *Hotspots* ao longo de células, em formato de um *cluster*. Aproveitando estes conceitos, os resultados do presente trabalho foram obtidos a partir de uma adaptação dos resultados de simulações adotando a topologia original de *clusters*, para uma geometria de coroa circular, através de aplicação de fator de segmento cujos detalhes são apresentados na seção 5.3.

A ferramenta de código aberto utilizada nas simulações do presente estudo, intitulada SHARC (*SHaring Ring and Compatibility studies*) (11), foi desenvolvida sob liderança da Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão da Anatel, conforme publicado por Edgar et al. em (18). O simulador SHARC é aderente à recomendação ITU-R M.2101 (17), utiliza método de Monte Carlo e foi aplicado em inúmeros estudos de compartilhamento de espectro realizados em preparação para a WRC-19 da UIT, suportando e fundamentando decisões para identificação de novas faixas de frequência para o IMT, tais como (39), (40) e (41). A ferramenta também vem sendo utilizada pela Anatel como suporte a estudos regulatórios nacionais para implantação da telefonia móvel 5G em banda C, tal como estudo de convivência entre 5G e sistemas de recepção de TV por satélite tipo TVRO (*TV Receive Only*) (42), bem como entre redes privadas 5G e estação terrena de recepção tipo FSS (12).

Um trabalho de grande relevância nesta temática trata-se de estudo submetido pela administração brasileira à UIT, sobre compartilhamento e compatibilidade entre sistemas IMT e Serviço Fixo por Satélite no uso da faixa de espectro 37-42,5 GHz (41). O estudo se concentrou no comportamento da interferência gerada por um *cluster* IMT-2020 sobre uma estação terrena receptora, em diferentes cenários simulados, porém basicamente variando distanciamento entre a borda do *cluster* e a estação terrena. Dentre os pontos em comum com o presente trabalho, inclui-se o foco em avaliar a faixa de frequência de *downlink* das bandas Q/V do satélite, a metodologia e simulador utilizados (11), os modelos de propagação e canal adotados e o indicador de desempenho para avaliação dos cenários de interferência (I/N) a ser aprofundado na seção 5.2. Dentre as principais diferenças, destaca-se que no presente trabalho, diferente do estudo da administração brasileira e conforme já mencionado, foi aplicado um fator de segmento, adaptando os resultados relativos ao *cluster* simulado, a fim de considerar os efeitos do agregado de emissões de estações base IMT distribuídas em formato de coroa circular. Outro ponto que diferencia os trabalhos, é que o presente estudo avalia o comportamento da interferência, a partir da variação de parâmetros da rede IMT, aplicando-se maiores restrições em termos de potência, quantidade de elementos e ângulo de *downtilt*, enquanto que o primeiro, centraliza na questão da variação de distância entre os sistemas apenas. Além disso, por se tratar de um canal de comunicação crítico de estação terrena TT&C, foi adotado um critério de proteção adotado mais restritivo, garantindo maior nível de proteção.

Queiroz et al. (39) desenvolveram um estudo de convivência entre o serviço de radiocomunicação em

plataformas altas HAPS (*High Altitude Platforms*) e o Serviço Fixo por Satélite em ondas milimétricas. Neste estudo, foi utilizada a mesma ferramenta de simulação que o presente trabalho em questão (11), avaliando os efeitos de interferência agregada (I/N). No entanto, principalmente por envolver dois sistemas "aeroespaciais", e não envolver o sistema IMT, a metodologia adotada, incluindo a topologia do cenário simulado e parâmetros do sistema interferente, variaram bastante em relação aos demais estudos. Também foram aproveitados conhecimentos sobre como foi aplicado o conceito de fator de segmento e perda de acoplamento.

Existem diferentes ferramentas e abordagens em trabalhos na área de compartilhamento de espectro entre sistemas 5G e outros serviços de radiocomunicação. O estudo de Teixeira (43), por exemplo, analisa o impacto de interferência em enlaces do serviço fixo (ponto a ponto) em 26 GHz. Diferente do presente trabalho, os estudos de Teixeira foram desenvolvidos com base em simulações executadas com software gratuito (44), desenvolvido pela organização regional de telecomunicações da Europa (CEPT), que implementa método de Monte Carlo e utiliza o conceito de MCL (*Minimum Coupling Loss*), que é um método para cálculo de requisitos mínimos para compartilhamento de espectro entre diferentes sistemas. Assim como o estudo (41), o trabalho de Teixeira visa o estabelecimento de proteção do serviço fixo através de distanciamento entre estações de ambos os sistemas. Porém, assim como o presente trabalho, Teixeira (43) não avaliou apenas a distância entre os sistemas, mas também outros parâmetros de RF do interferente, tais como número de células na topologia, ganho da antena, número de setores, número de usuários e altura da antena do serviço fixo.

Publicações da UIT também serviram de base conceitual sobre IMT-2020 (45) e aspectos de sistemas TT&C em redes de satélites (9), assim como referências metodológicas de conceitos e técnicas de compartilhamento de espectro envolvendo o IMT-2020 adotadas no presente estudo (17), e que possuem forte caráter de ineditismo. Tendo em vista que os trabalhos utilizados como base para este foram desenvolvidos no decorrer dos últimos anos que antecederam a referida WRC-19 da UIT como subsídio para decisões regulatórias em nível global, ainda não compõem obras literárias como livros, mas basicamente artigos acadêmicos, e documentos técnicos formais submetidos por países, empresas, centros de pesquisa e universidades no âmbito de Comissões de Estudos e demais foros da UIT correlatos ao tema de identificação de faixas de frequências para operação do IMT-2020 (5G). Em especial, destacam-se os documentos relativos a estudos do tipo *sharing studies* do Grupo TG 5/1 responsável pelos estudos necessários para identificação de faixas de frequências para o IMT-2020, bem como dos Grupos de Trabalho WP5D que trata de IMT-2020, e do WP4A, que trata do serviço fixo por satélite na UIT.

Compartilhamento de espectro entre TT&C e serviços terrestres

O tema de compartilhamento de espectro entre sistemas TT&C e outros serviços de radiocomunicação terrestres não é um assunto novo, e referências podem ser encontradas lidando com abordagens sobre o assunto, em diferentes faixas de frequências, como é o caso do estudo de Chalfant (46) apresentado na Conferência Europeia de Teste e Telemetria (ETTC) 2018.

Canais de comunicação TT&C são usados por aplicações de alta criticidade. Neste sentido, Chalfant (46) defende que novas abordagens devem ser exploradas para preservar a segurança de sistemas tão sensíveis, ao mesmo tempo em que é promovido um uso mais eficiente do espectro. Neste contexto, o tópico sobre Telemetria Móvel Aeronáutica (AMT) foi endereçado por Chalfant (46), que propôs uma reflexão

sobre os desafios do congestionamento do ambiente espectral, levando a novas ideias sobre melhores ferramentas e metodologias para acomodar operações de telemetria neste novo cenário de espectro densamente ocupado com a tecnologia IMT.

O trabalho de Chalfant indica que, apesar de que a indústria de TT&C também deve evoluir por meio da promoção de pesquisas em novas tecnologias e conceitos para operar em um ambiente espectral compartilhado, também há oportunidades para estudar maneiras de proteger as operações de TT&C pela adoção de variações técnicas no outro sistema que compartilha a faixa, que seria o IMT-2020 neste caso. Neste cenário, levando em conta a perspectiva de uso de feixes diretivos, entende-se que os avanços no campo de antenas inteligentes, especialmente em termos de técnicas conformação de feixes e cancelamento de lóbulos secundários, podem ajudar a remoção de interferências cocanal a estações TT&C.

O conceito aqui discutido pode ser encarado claramente como uma das novas ferramentas apontadas por Chalfant (46), para estabelecer a "fortaleza" de RF necessária para proteção de aplicações críticas TT&C via satélite, em um ambiente espectral congestionado.

Em 2018, o órgão regulador nacional de espectro de Hong Kong emitiu uma decisão (47) sobre a mudança da atribuição primária da faixa de frequência de 3,4 a 3,7 GHz do Serviço Fixo por Satélite para o Serviço Móvel. Devido ao fato de haver estações terrenas TT&C em Hong Kong operando nessa faixa e reconhecendo sua importância para a operação de satélites licenciados atualmente em órbita, a decisão também definiu que as estações TT&C deverão ser protegidas de interferências geradas pelo serviço móvel. Neste sentido, uma exceção à atribuição primária do IMT foi criada, permitindo com que as estações terrenas TT&C tenham uma espécie de status "primário" em duas zonas de restrição (Tai Po e Stanley), onde tais estações estão localizadas, conforme figura 4.1.

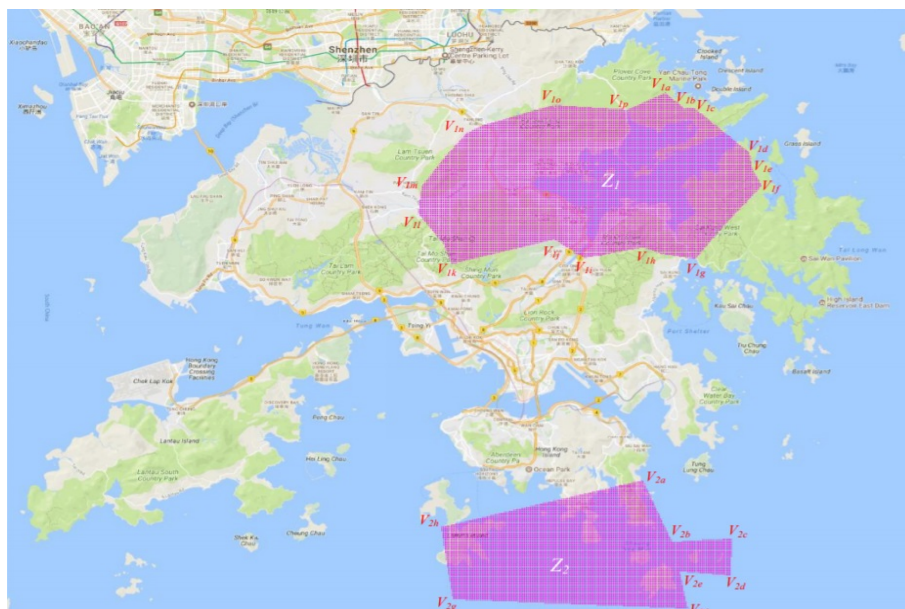


Figura 4.1: Zonas de restrição para proteção de estações terrenas TT&C em Hong Kong

Em tais regiões, polígonos geográficos são delineados para restringir a implantação de estações base do serviço móvel (BSs) operando na faixa de 3,4 a 3,6 GHz.

De acordo com a decisão do regulador, uma separação espacial entre estações TT&C e estações base

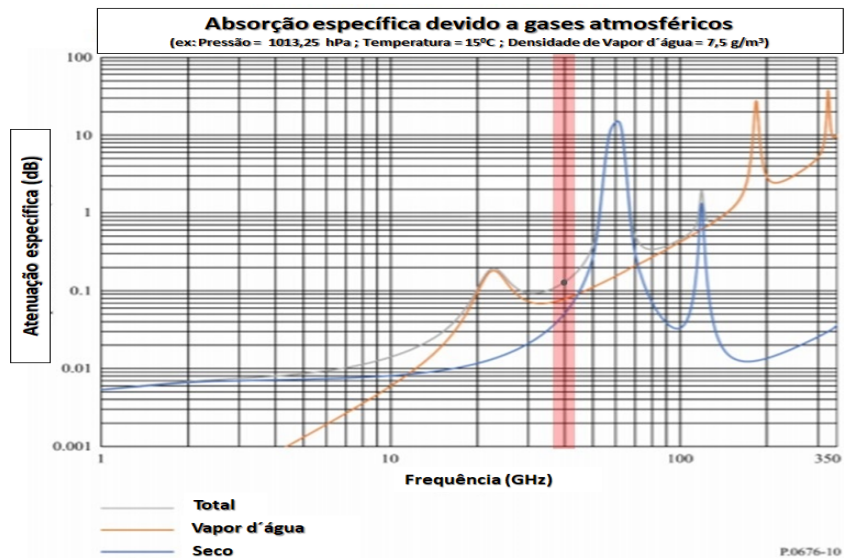


Figura 4.3: Atenuação atmosférica de (adaptado Rec. ITU-R P.676)

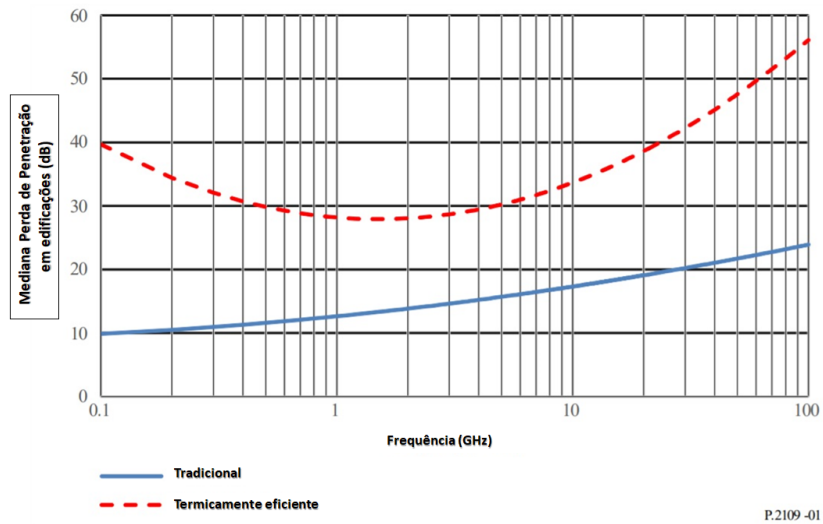


Figura 4.4: Perda de penetração em edificação (fonte: Rec. ITU-R P.2109)

Os comportamentos ora mencionados são particularmente importantes em ondas milimétricas, e configuram um fator positivo para melhor proteção contra emissões IMT-2020 em faixa compartilhada.

4.2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO E DE CANAL APLICADOS

Um dos elementos principais para análise de um cenário de rádio interferência consiste na identificação dos modelos de propagação mais adequados aos ambientes envolvidos. A predição de interferências requer a aplicação de mecanismos de propagação que podem prever de maneira mais realista a influência que o ambiente irá exercer sobre a forma como o sinal interferente irá propagar, sendo assim determinantes para a predição dos níveis de interferência recebidos na estação TT&C (vítima). Esta seção apresenta elementos de fundamentação, além de citar bibliografias relevantes e comparações com o presente trabalho.

Os modelos de propagação a serem considerados podem ser agrupados em dois tipos, modelos "intra-sistema" são aqueles que se aplicam à predição do enlace de comunicação entre estação base IMT e os terminais de usuário. O segundo grupo, dos modelos "inter-sistemas", é aplicado na predição de propagação do sinal interferente no percurso até a antena do sistema interferido.

Inicialmente cabe mencionar duas recomendações fundamentais para compreensão de cenário de coordenação em bandas Q e V, sendo elas as recomendações ITU-R P.2109 (49), que endereça a perda de penetração em edificações (*Building Entry Loss*), e a ITU-R P.676 (48) que trata de atenuação por gases atmosféricos e efeitos relacionados, e cujas curvas foram apresentadas nas figuras 4.3 e 4.4 da seção 4.1. Além dessas, é dado um grande enfoque aos mecanismos de propagação aplicáveis ao percurso do sinal interferente, emitido pelo agregado de estações IMT até a estação terrena TT&C, ou seja, da propagação de sinais "inter sistemas". Neste contexto, são aplicados os conceitos da recomendação ITU-R P.452 (50) que trata de procedimentos para predição de interferência entre estações na superfície da terra em frequências acima de 0,1 GHz, bem como a recomendação ITU-R P.2108 (45) que define métodos para calcular perdas por obstruções (*clutter loss*), conceitos que serão aprofundados mais adiante.

Em relação aos modelos de propagação, foram utilizadas recomendações da UIT (50),(49) e (48), bem como modelo de canal móvel *Urban Micro* para descrever o canal móvel, desenvolvido no âmbito do órgão de padronização de tecnologias móveis 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) (51), também descrito no Relatório ITU-R M.2412 (52), e que serão tratados a seguir. Conforme já mencionado, o trabalho fez uso de ferramenta de simulação resultante de projeto de desenvolvimento colaborativo com publicações qualificadas (18) e (11), e cuja aplicação prática no presente estudo é aprofundada na seção 5.2. A metodologia de simulação adotada na ferramenta (17), incluindo diagramas de antena da estação terrena TT&C (4), e de estações base IMT-2020 com tecnologia de conformação de feixes, seguem padrões consolidados, e conhecimentos teóricos oriundos do 3GPP. O trabalho também utilizou como fonte de estudo, teoria de antenas inteligentes, referências de recomendações (17) (3) e artigo (53) sobre técnicas de conformação de feixes de antenas IMT-2020.

Modelos de propagação e o cálculo de perda de acoplamento

A perda de acoplamento é considerada como o resultado da razão entre a potência do sinal transmitido pelo sistema interferente, que neste caso é a estação base IMT, sobre aquele efetivamente recebido pela estação terrena TT&C, interferida. Em outras palavras, para que o valor do parâmetro $I_{External}$ seja obtido, é necessário calcular a perda de acoplamento da interferência.

Os modelos de propagação e canal, bem como diagramas de antena, são fundamentais para estimar as perdas de propagação e os ganhos de transmissão e recepção da interferência, e que compõem o cálculo de perda de acoplamento. A expressão abaixo descreve as componentes da perda de acoplamento aplicadas nas simulações do presente estudo.

$$P_{acoplamento} = P_{propag.} - G_{tx} - G_{rx} + P_{ohmicas(tx \ e \ rx)} + P_{polariz.} \quad dB \quad (4.1)$$

As perdas de propagação são aplicadas conforme apresentado no item 4.2, o parâmetro G_{tx} representa o ganho da antena da estação base IMT na direção da antena da estação terrena TT&C, o qual irá variar em função da geometria entre a direção da conformação de feixe da estação na direção do usuário IMT e o posicionamento da estação terrena, associada ao diagrama resultante da conformação de feixe conforme apresentado na seção 4.3. Da mesma forma, o parâmetro G_{rx} refere-se ao ganho da antena da estação terrena na direção da estação base IMT, e que irá depender basicamente da geometria resultante do posicionamento das duas antenas, associada ao diagrama da antena receptora da estação terrena (4). As perdas ôhmicas referem-se a perdas de cabeamento e conectores no sistema de transmissão, definidas em 3dB, assim como perda de polarização resultante de diferentes polarizações adotadas entre estação base e estação terrena TT&C.

Perdas de transmissão - conceitos

Em linhas gerais, em estudos de predição são calculados essencialmente valores relacionados às perdas de transmissão ao longo do(s) percurso(s) de interesse. Neste contexto, merece uma conceitualização mais precisa o que a literatura chama de "Perda de Transmissão", "Perda de Transmissão Básica" e "Perdas de Propagação", mencionados nos modelos aplicados no estudo em questão. Estes conceitos são observados na recomendação ITU-R P.341 (2).

Em um enlace de radiocomunicações, mesmo em um cenário de propagação de radio interferência como é o caso do estudo em questão, a razão entre a energia do sinal interferente transmitido e a energia do sinal entregue ao receptor do sistema interferido variam em função de questões como perdas de antenas, perdas devido a qualidade das linhas de transmissão de alimentação das antenas, atenuação relacionada a propagação, problemas de descasamentos de impedância e também falhas em ajustes de polarização.

A figura 4.5 ilustra os diferentes componentes de perdas.

Perda de Transmissão Básica Espaço Livre - L_{bf}

O espaço livre é definido (54) como um vácuo perfeito que pode ser considerado de extensão infinita em todas as direções, de maneira que a propagação espacial é a propagação de uma onda de rádio irradiando em espaço livre.

A "Perda de Transmissão Básica Espaço Livre" (L_{bf}) refere-se à razão (em dB) entre a potência irra-

Conceito de Perda de Transmissão - Termos

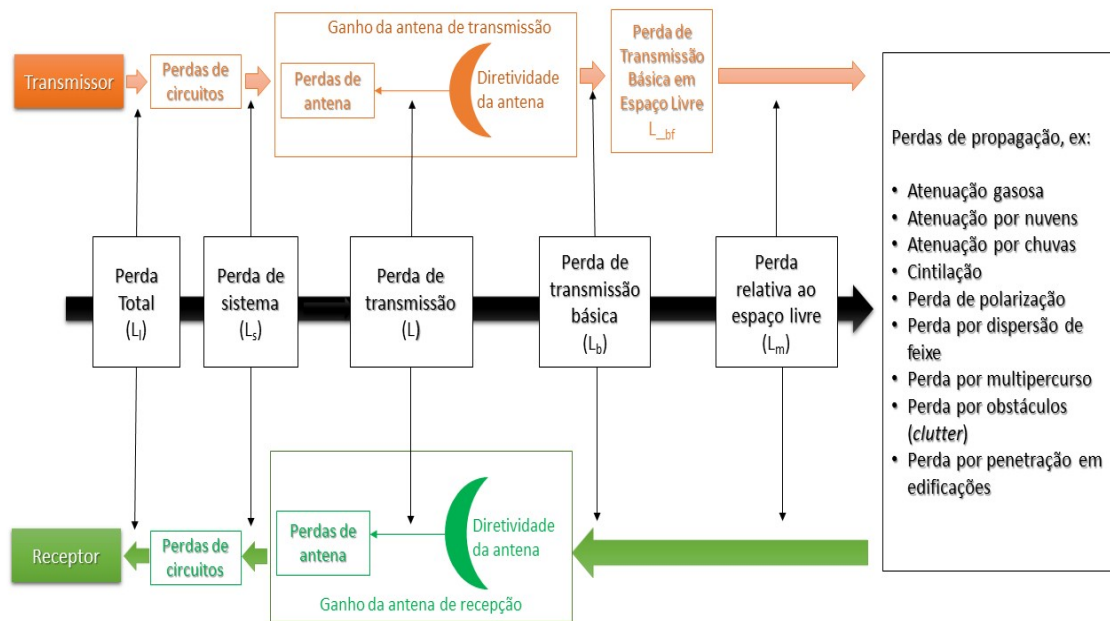


Figura 4.5: Representação gráfica de termos usados no conceito de perda de transmissão (2) (adaptação do autor)

diada pela antena transmissora e a potência que estaria disponível à entrada da antena de um receptor se as antenas fossem substituídas por antenas isotrópicas sem perdas localizadas em um ambiente dielétrico perfeito, homogêneo, isotrópico e ilimitado, para uma dada distância d , e expressões abaixo:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad dB \quad (4.2)$$

Onde:

L_{bf} : perda de transmissão básica espaço livre (dB)

d : distância

λ : comprimento de onda (mesma unidade de d)

ou, em função da frequência, conforme abaixo:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad dB \quad (4.3)$$

Onde:

f : frequência (MHz)

d : distância (km)

Perda de Transmissão Básica - L_b

O conceito de "Perda de Transmissão Básica"(2) refere-se à razão (em dB) entre a potência irradiada

pela antena transmissora e a potência que estaria disponível à entrada da antena de um receptor se as antenas fossem substituídas por antenas isotrópicas com a mesma polarização que as antenas reais, incluindo os efeitos de atenuação de propagação do percurso, porém desconsiderando obstáculos próximos às antenas.

$$L_b = L_{bf}(\text{perda básica esp. livre}) + L_m(\text{perda relativa ao esp. livre}) \quad dB \quad (4.4)$$

As perdas relativas ao espaço livre (L_m) podem ser divididas em diversos fenômenos indicados dentre as perdas de propagação do diagrama da figura 4.5.

Perda de Transmissão - L

A "Perda de Transmissão" (L) (2) refere-se à razão entre a potência irradiada pela antena transmissora e a recebida pela antena do receptor como se os diagramas de antenas (transmissora e receptora) fossem substituídos por circuitos de RF sem perdas.

$$L = L_b(\text{perda de transm. básica}) - G_t - G_r \quad dB \quad (4.5)$$

Onde G_t e G_r são os ganhos de diretividade das antenas transmissora e receptora, respectivamente, na direção de propagação do sinal interferente.

Perda do Sistema - L_s

A "Perda do Sistema" (L_s) é definida (2) pela razão da potência do sinal nos terminais da antena transmissora e a potência de sinal resultante nos terminais da antena de recepção.

$$L_s = L(\text{perda de transm.}) + L_{tc}(\text{perda circuit. TX}) + L_{rc}(\text{perda circ. RX}) \quad dB \quad (4.6)$$

Onde L_{tc} e L_{rc} são as perdas nos circuitos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, não contabilizando a dissipação associada à irradiação das antenas, tampouco inclui perdas de linhas de alimentação das antenas.

Perda Total - L_l

Finalmente, a "Perda Total" (L_l) do enlace de radiocomunicação é definida (2) como a razão entre a potência entregue pelo transmissor e a potência fornecida ao receptor correspondente em condições reais de instalação, propagação e operação. Esta perda é definida entre a entrada da linha de alimentação da antena de transmissão e a saída da linha de alimentação da antena de recepção. As linhas de alimentação podem incluir filtros e multiplexadores.

Modelos para predição do sinal interferente (ITU-R P.452, ITU-R P.676 e ITU-R P.2108)

Os modelos de propagação da recomendação ITU-R P.452 (50) se aplicam ao percurso do sinal interferente até o receptor do sistema vítima, que no caso do estudo em questão será a estação terrena TT&C. Esses são desenhados para calcular perdas de propagação de sinais indesejáveis não excedidas em percentuais de tempos no intervalo de $0,001\% \leq p \leq 50\%$. Neste sentido, devem ser aplicados os mecanismos relevantes ao caso concreto, incluindo métodos para analisar características radio meteorológicas e topográficas do trajeto entre o transmissor que neste caso são as estações do IMT, e o receptor da estação terrena TT&C.

A bibliografia (50) prevê sete mecanismos de propagação de interferência, agrupados em mecanismos de curto e longo prazos. A dominância individual de cada um desses mecanismos para o cenário de interferência depende de diferentes fatores como clima, frequência de operação, percentual de tempo de interesse, distância e topografia do percurso. Sendo eles agrupados em mecanismos de longo prazo (linha de visada, difração e dispersão troposférica) e curto prazo (linha de visada reforçada por multipercurso, canalização, reflexão/refração em camada elevada e dispersão por hidrometeoro, chuva), ilustrados conceitualmente nas figuras 4.6 e 4.7.

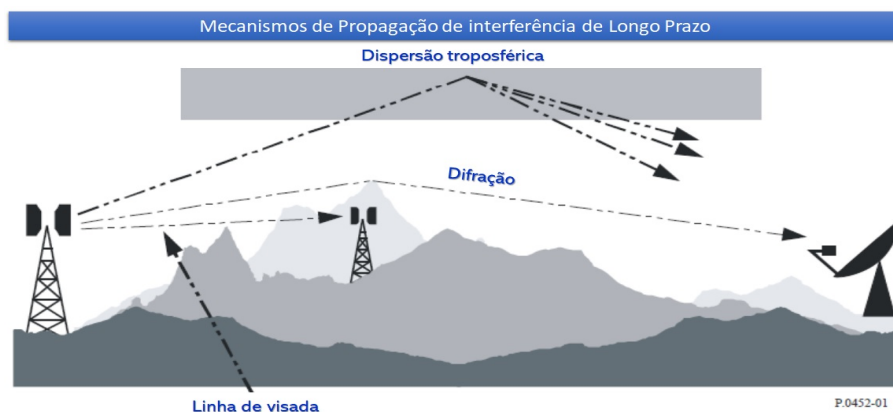


Figura 4.6: Mecanismos de Propagação de Longo Prazo (fonte: Rec. ITU-R P.452)

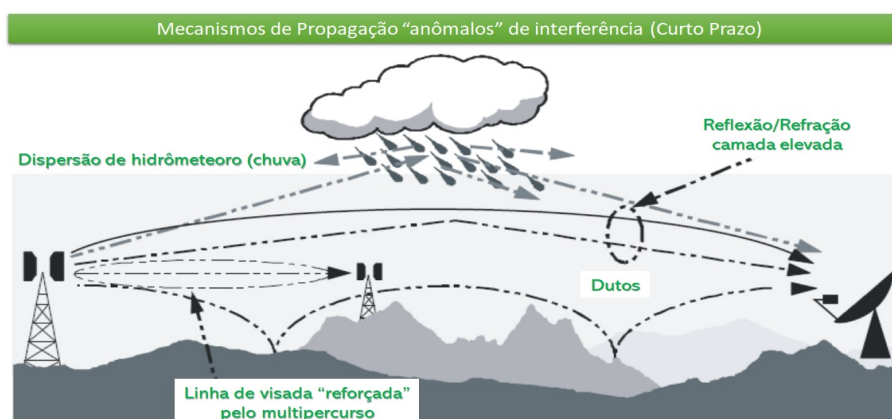


Figura 4.7: Mecanismos de Propagação de Curto Prazo (fonte: Rec. ITU-R P.452)

A seguir, são compiladas as características principais dos mecanismos de propagação aplicáveis ao caso do estudo em questão,

Linha de visada - Situação de propagação de interferência mais direta, ocorre quando há linha de visada entre a fonte interferente e o receptor do sistema vítima, em condições atmosféricas normais.

Difração - Efeitos de difração geralmente dominam quando níveis significativamente elevados de sinais estão presentes. Quando efeitos de curto prazo não são relevantes para o serviço de interesse, a precisão da predição de difração é determinante na modelagem. A predição de difração deve ser capaz de cobrir modelo de terra-plana, situações de obstáculo discreto e terrenos irregulares/não estruturados.

A dominância dos mecanismos varia com diferentes condições meteorológicas e de percurso. O presente estudo não objetiva aprofundar em demasia os conceitos dos modelos de propagação tampouco abordar

mecanismos que não se aplicam. Sendo assim, maiores detalhes podem ser obtidos na recomendação ITU-R P.452 (50). Na busca pelo cenário mais realista, em geral, foram utilizados mecanismos básicos de propagação tais como linha de visada, difração e variação de obstrução *clutter* em conjunto com a recomendação ITU-R P.2108 (45). Neste contexto, foram empregados parâmetros radiometeorológicos, tais como:

ΔN (N unidades/km) - Gradiente de refratividade. Representado pela diferença entre o índice de refratividade a 1 km de altura e aquele ao nível do solo. Em outras palavras, representa o intervalo do índice médio de radio refratividade ao longo do 1 km mais baixos da atmosfera, ou seja, a média da diferença entre os valores de índice de refração na superfície e 1000 m acima da superfície. A recomendação ITU-R P.452-16 (50) inclui mapas digitais desses parâmetros ao redor do globo.

β_0 (%) - Percentual de tempo que o intervalo do índice de refratividade (ΔN) pode exceder 100 unidades nos 100 m da atmosfera mais baixa. O valor de β_0 a ser usado é aquele relativo à latitude do centro do percurso.

Cabe destacar que, a fim de aplicar os mecanismos de propagação no presente estudo, os parâmetros climatológicos característicos são implementados como parâmetros de entrada da ferramenta de simulação utilizada (11). Foram utilizados valores típicos relativos a uma localidade genérica do território nacional, com representatividade para o estudo em questão.

Tendo em vista a difração ser um tema de grande abrangência e complexidade técnica, o presente trabalho não se aprofunda no passo a passo de todos os cálculos e conceitos relacionados, recomendando-se para tal a referência (50).

Por fim, é importante lembrar que o objetivo dos cálculos de predição nesta seção referem-se exclusivamente a estimativa de perda por difração para fins de predição do sinal interferente que propaga da estação base até a antena da estação terrena TT&C, e não propriamente do sinal desejado.

Perdas adicionais por obstruções - *Clutter* (ITU-R P.2108)

Obstruções geradas por objetos na superfície, tais como edificações e vegetação, mas que não são exatamente parte da natureza do terreno, promovem proteção adicional ao sistema interferido, ao impor atenuações que se somam aos demais mecanismos de propagação. Durante a análise de interferência pode ser necessário contabilizar a atenuação sofrida pelas ondas que percorrem tais objetos. O modelo adotado para contabilizar este tipo de perda no estudo em questão é obtido da Recomendação ITU-R P.2108 (45), cujo método de predição se baseia em modelos estatísticos a serem utilizados quando não há um conhecimento preciso do percurso do sinal, tais como dados sobre arruamentos, alturas de prédios ou profundidade da vegetação.

A perda por obstrução (*clutter*) é definida (45) como a diferença entre a perda de transmissão, ou perda de transmissão básica, com e sem a presença de obstrução ao terminal em ambos os lados do percurso, com todos os demais detalhes do percurso sendo os mesmos. O modelo estatístico adotado pode ser aplicado para modelar a distribuição de obstáculos nas duas extremidades do percurso.

A aplicação deste tipo de perda se dá, basicamente, a partir do cálculo de um valor de perda adicional (*clutter*) a ser somada à perda de transmissão ou perda de transmissão básica. O modelo (45) define que as perdas por obstruções podem ser contabilizadas em ambos os lados do percurso, transmissor e receptor,

Perda por obstruções (*Clutter*) para percursos terrestres

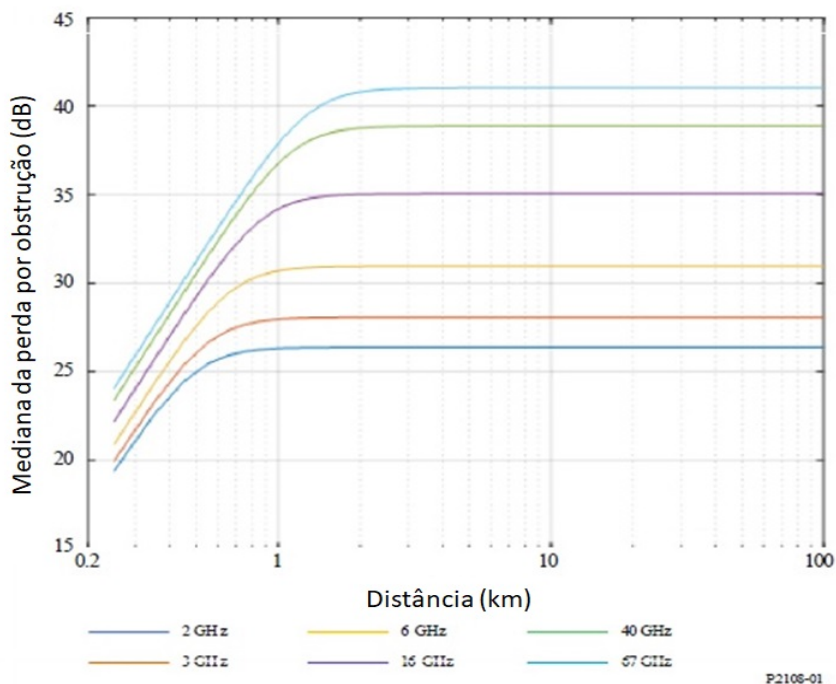


Figura 4.8: Perda por obstruções *Clutter* em enlaces terrestres (fonte: ITU-R P.2108)

mas em percursos mais curtos contabiliza-se apenas em um dos lados. No caso de enlaces interferentes com distâncias acima de 250 m, consideram-se perdas por obstruções (*clutter*) próximas à estação interferente (estação base IMT) e, a partir de 1000 m, considera-se também perdas por obstruções nas proximidades da estação interferida, neste caso a estação terrena TT&C.

Os parâmetros de entrada do modelo estatísticos são frequência (GHz), distância do percurso (km) e percentual de locais, sendo calculado conforme (45). A figura 4.8 apresenta a mediana da perda para diferentes frequências e distâncias de percurso de 250 m a 100 km.

Cálculo de Perda de Transmissão

Os métodos de cálculos indicados anteriormente referem-se a contabilização da perda de transmissão básica no que tange aos aspectos/mecanismos de propagação. No entanto, conforme descrito no item 4.5, para calcular a perda de transmissão (L), é necessário também contabilizar as perdas decorrentes da geometria entre eixos de transmissão das antenas envolvidas no enlace em questão. Quanto maior o ângulo de discriminação entre os apontamentos das antenas transmissora e receptora, menores serão os valores dos ganhos nas direções entre ambas antenas, seguindo o modelo de predição adotado (50). Para determinação do ganho da antena de transmissão (G_t) das estações base IMT, no presente estudo utilizou-se o diagrama decorrente de padrão de conformação de feixes indicado na recomendação ITU-R M.2101 (17). Para determinação do ganho da antena de recepção da estação terrena TT&C (G_r), adotou-se o diagrama de antena da recomendação ITU-R S.580 (4). Este tema é aprofundado na seção 4.3.

Síntese geral dos modelos de propagação aplicados

A fim de facilitar uma visão geral consolidada dos modelos e parâmetros relevantes para predição no

contexto do presente estudo, a figura 4.9 ilustra os modelos (50) aplicados no estudo em questão no formato de síntese de mapa mental.

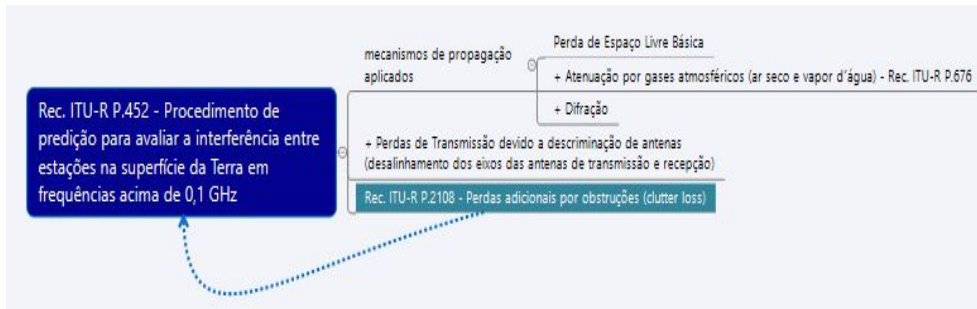


Figura 4.9: Mapa mental resumindo aplicação dos modelos de previsão do percurso da interferência (fonte: autor)

Modelo de canal no sistema móvel

Para a predição relativa a comunicação entre os terminais móveis e estações base IMT, utiliza-se modelo de canal móvel padronizado pelo 3GPP *Urban Micro (UMi)* (51). Este padrão também é referenciado em relatório de avaliação de tecnologias 5G da UIT (52) e aplica as expressões a seguir para a frequência do estudo em questão.

Perda de Percurso (PL)

O cálculo da perda de percurso irá depender da probabilidade do enlace ter linha de visada (LOS), ou não ter linha de visada (NLOS). A determinação se é 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 base IMT e o terminal de usuário.

Para percurso com linha de visada (LOS), aplica-se:

$$PL_{UM_i-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases}$$

$$PL_1 = 32,4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c), \sigma_{SF} = 4 \text{ dB}$$

$$PL_2 = 32,4 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9,5\log_{10}((d_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2), \sigma_{SF} = 4 \text{ dB}$$

Para percurso sem linha de visada (NLOS), aplica-se:

$$PL_{UM_i-NLOS} = \max(PL_{UM_i-LOS}, PL'_{UM_i-NLOS}), \sigma_{SF} = 7,82\text{dB}, 10m \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$$

$$PL'_{UM_i-NLOS} = 35,3\log_{10}(d_{3D}) + 22,4 + 21,3\log_{10}(f_c) - 0,3(h_{UT} - 1,5)$$

$$(\text{opcional}) PL = 32,4\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) + 31,9\log(d_{3D}) \quad \sigma_{SF} = 8,2 \text{ dB}$$

$$h_{BS} = 10m, 1,5m \leq h_{UT} \leq 22,5 \text{ m}$$

A probabilidade de LOS em (52) é definida conforme abaixo.

Para usuários *Outdoor*:

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

Para usuários *Indoor*, usar d_{2D-out} na fórmula acima, ao invés de d_{2D} .

Onde :

d_{BP} é a distância de ponto de quebra;

h_{BS} é a altura da antena da estação base;

h_{UT} é a altura da antena do terminal do usuário;

d_{2D} é a distância 2D (em solo) entre a antena da estação base e o terminal;

d_{2D-out} é a distância 2D (em solo) entre a antena da estação base e a edificação, ou seja, relativa ao trecho *outdoor*;

d_{3D} é a distância 3D entre a antena da estação base e o terminal;

f_c é a frequência central de operação;

σ_{SF} é desvio padrão de *shadow fading*.

4.3 DIAGRAMAS DE ANTENA E PADRÃO DE CONFORMAÇÃO DE FEIXES

As antenas são elementos das cadeias de transmissão e recepção que desempenham papel fundamental na forma como os sinais interferentes, que se propagam por meio de ondas eletromagnéticas, serão direcionados no meio, bem como na forma como o sinal será rejeitado e/ou recebido pela antena do sistema interferido. Esta sessão irá tratar dos conceitos especificamente relacionados aos diagramas de antenas usadas no estudo em questão e suas implicações para o resultado de proteção ao canal de comunicação crítico TT&C. Além do padrão de antena da estação terrena TT&C interferida, esta seção apresentará o padrão de antena inteligente da estação base IMT com técnica de conformação de feixes, a qual permite focalizar o sinal em um feixe concentrado que aponta somente na direção de um usuário, ao invés de difundir o sinal, sem critério, em várias direções ao mesmo tempo. Esta abordagem reforça a qualidade da transmissão do sistema bem como reduz a interferência em outros sistemas.

Padrão de conformação de feixes de antenas de estação base IMT

Antenas tradicionais possuem diagramas de irradiação fixos, ocasionando limitações em termos de capacidade fornecida aos terminais de usuários, bem como de uso eficiente do espectro, pois tendem a aumentar a interferência cocanal a outras estações do mesmo sistema, e de outros sistemas compartilhando a mesma faixa de frequências. Para melhorar este cenário, novas tecnologias de antenas inteligentes que empregam técnicas de conformação de feixes têm evoluído de maneira acelerada, especialmente com as redes IMT-2020 (5G). Neste contexto, os sistemas de antenas mais avançados, são compostos por arranjos com múltiplos elementos de antenas, tanto na estação base quanto no terminal de usuário. Os sistemas MIMO, por exemplo, permitem diversos fluxos de sinais serem usados para transmitir e receber em diversidade, bem como realizar uma multiplexação espacial, moldar o formato do feixe e até direcionar nulos para a fonte ou receptor indesejado. Em frequências mais altas, como a faixa de 40 GHz objeto do presente estudo, é possível o uso de antenas menores, com aumento considerável no número de elementos de antenas. Um número maior de elementos, por sua vez, permitirá gerar um feixe com formato mais estreito, reduzindo o potencial de interferências ao sistema vítima TT&C. Além disso, um maior ganho do feixe poderá superar as altas perdas de percurso típicas em altas frequências de ondas milimétricas, permitindo múltiplos fluxos para múltiplos usuários.

Neste sentido, as antenas de estações base que empregam as tecnologias de conformação de feixes moldam, dinamicamente, o diagrama de radiação, ajustando as direções do feixe principal e nulos a partir da posição dos terminais de usuários. Este ajuste dinâmico permite redução na interferência, melhorando o SINR. Um cenário desejado de operação é ilustrado pela figura 4.10, no qual a conformação de feixes da estação base é capaz de direcionar feixes aos terminais e, ao mesmo tempo, aplicar nulos nas direções de outras estações operando em cocanal, tais como outra estação base IMT ou a própria estação terrena TT&C no caso do estudo em questão. No caso desta figura, a aplicação de nulo na direção da antena da estação terrena TT&C receptora, apresentada de maneira "conceitual", somente ocorreria em casos em que o sistema IMT possuísse acesso ao dado da coordenada geográfica da estação TT&C e possuísse algoritmo de conformação dinâmico de feixe que interpretasse esse dado e controlasse o diagrama da antena da estação base para tal. Apesar de não se descartar esta possibilidade de solução no futuro, é necessário deixar claro que tal técnica não é explorada pelo presente estudo.

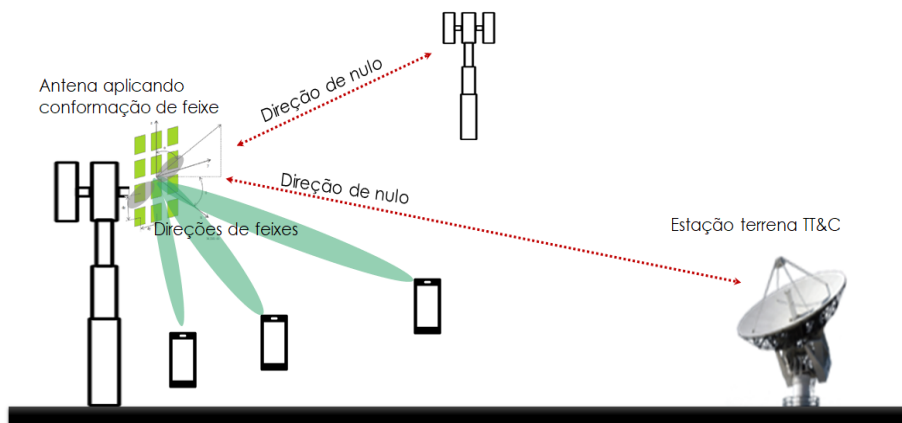


Figura 4.10: Conformação de feixes (conceito genérico)

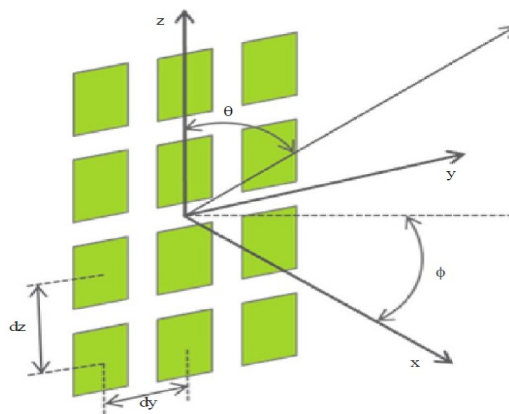


Figura 4.11: Geometria do modelo de antena - ITU-R M.2101

Em redes 5G, especialmente em frequências mais altas, é esperado o uso de antenas com conformação de feixes, intitulados Sistemas Avançados de Antena (AAS). De acordo com a recomendação ITU-R M.2101 (17), tais técnicas são implementadas por meio de arranjos de antenas com múltiplos elementos iguais, dispostos em um plano y-z, com uma distância de separação fixa. Todos os elementos possuem diagramas de radiação iguais, dispostos no sentido do eixo x. Conforme a teoria de arranjos adaptativos, uma função de atribuição de pesos é utilizada para direcionar o feixe nas diferentes direções. O ganho total da antena é a soma (em escala logarítmica) do ganho do arranjo e ganho do elemento.

A geometria do modelo de antena, e a identificação das características e parâmetros angulares (θ e ϕ) que compõem o arranjo podem ser observados na figura 4.11 (17). Os elementos da antena são dispostos em sistema de coordenadas cartesianas, de maneira uniforme, ao longo do eixo z. O plano x-y compõe o plano horizontal. O ângulo de elevação da direção do sinal na conformação de feixe é representado por θ , cujo intervalo é 0 a 180 graus. O ângulo de azimute é representado por ϕ , e cujo range vai de -180 a 180 graus.

Um sistema IMT usando AAS irá controlar ativamente todos os sinais individuais que alimentam os elementos do arranjo de antena, no intuito de modelar o formato e direcionamento de feixes aos usuários. O modelo de arranjo de antena AAS é determinado pelo diagrama do elemento do arranjo, fator de arranjo e sinais aplicados ao sistema de arranjo. O diagrama de elemento e diagrama composto da antena

implementado pelo modelo adotado são descritos em detalhes em padrão 3GPP (3).

Modelagem do diagrama de radiação do elemento do arranjo

Como visto, cada elemento do arranjo possui um diagrama de radiação próprio. Entretanto, 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), da atenuação de 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 a seguir.

Para conceitualizar, 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.

Para o estudo em questão, em relação aos parâmetros dos referidos elementos do arranjo de antena da estação base IMT, adotou-se valores típicos de 65 graus para ângulos de meia potência ϕ_{3dB} e θ_{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, $G_{E,max}$.

A expressão do diagrama de radiação do elemento é formada pela composição dos diagramas de radiação horizontal ($A_{E,H}(\phi)$) e vertical ($A_{E,V}(\theta)$), conjugados com ganho máximo do elemento. Os diagramas horizontal e vertical do elemento, respectivamente, são descritos pelas expressões abaixo:

$$A_{E,H}(\phi) = -\min \left[12 \left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}} \right)^2, A_m \right] dB \quad e \quad A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta - 90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right] dB \quad (4.7)$$

A figura 4.12 apresenta os diagramas do elemento nos planos vertical e horizontal extraída do padrão 3GPP adotado (3). O diagrama de radiação do elemento, formado por uma composição dos diagramas horizontal e vertical, é descrito pela expressão abaixo.

$$A_E(\phi, \theta) = G_{E,max} - \min \{ -|A_{E,H}(\phi) + A_{E,V}(\theta)|, A_m \} dB \quad (4.8)$$

Modelagem do diagrama de radiação composto do arranjo de antena

O diagrama de conformação de feixe do arranjo será um diagrama composto, $A_A(\theta, \phi)$, resultante da soma logarítmica do ganho de arranjo, também chamado de fator de arranjo, e do ganho do elemento $A_E(\theta, \phi)$. Ele é aplicado para que o arranjo atenda um ou mais usuários, com um ou mais feixes "moldados", representados pelo indicativo "i".

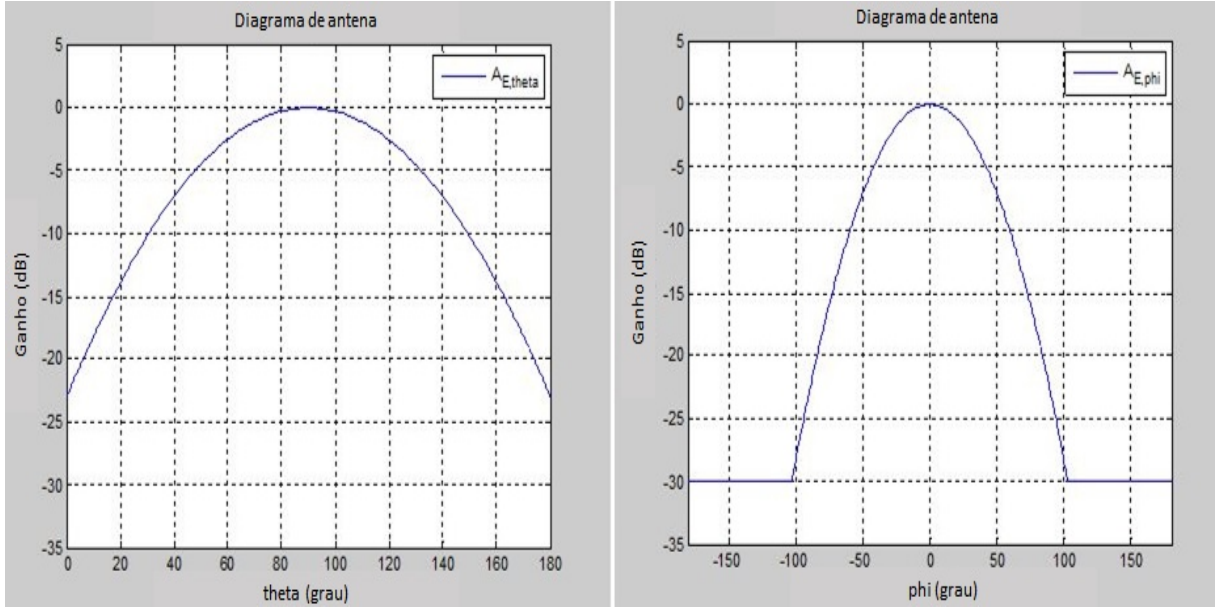


Figura 4.12: Diagramas vertical ($A_{E,V}(\theta)$) e horizontal ($A_{E,H}(\phi)$) do elemento (3)

O fator de arranjo \tilde{W} é definido (3) como o diagrama de um arranjo de antena quando cada elemento do arranjo é considerado como se irradiasse isotropicamente. Quando os diagramas dos elementos individuais do arranjo são idênticos, o produto entre o fator de arranjo e o diagrama de radiação do elemento provê o diagrama de radiação do arranjo inteiro.

Para um arranjo retangular uniforme (URA), o fator do arranjo irá variar em função do tamanho do arranjo, ou seja, da quantidade de linhas e colunas (N_H e N_V), espaçamento entre elementos (d_H e d_V) e mudanças de fase e amplitude. O número de elementos ao longo do eixos y e z da figura 4.11 são N_H e N_V , respectivamente.

$$\tilde{W} = W \cdot V$$

Onde V representa a mudança de fase devido ao posicionamento da matriz.

$$V = [v_{1,1}, v_{1,2}, \dots, v_{1,N_V}, \dots, v_{N_H,1}, v_{N_H,2}, \dots, v_{N_H,N_V}]^T \quad (4.9)$$

Onde $v_{n,m}$ é o vetor sobreposição dado por:

$$v_{m,n} = \exp \left(i \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_v}{\lambda} \cdot \cos(\theta) + (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \right) \right) \quad (4.10)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_V; m = 1, 2, \dots, N_H; \quad (4.11)$$

Com relação a W , este representa um "vetor de consignação de pesos", sendo responsável pelo controle dos níveis de lóbulos secundários e também pelo direcionamento elétrico de feixes horizontal e vertical, por meio de variação de fase, além disso, depende dos ângulos de direcionamento vertical e horizontal bem

como o espaçamento entre elementos (d_H e d_V).

$$W = [w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,N_V}, \dots, w_{N_H,1}, w_{N_H,2}, \dots, w_{N_H,N_V}]^T \quad (4.12)$$

Onde $w_{m,n}$ para definir vetor de pesos, é dado por:

$$w_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left(i \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_v}{\lambda} \cdot \text{sen}(\theta_{\text{etilt}}) - (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \cos(\theta_{\text{etilt}}) \cdot \text{sen}(\phi_{\text{escan}}) \right) \right) \quad (4.13)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_V; m = 1, 2, \dots, N_H; \quad (4.14)$$

Onde θ_{etilt} é o ângulo entre a direção de ganho máximo da antena e o plano horizontal (*downtilt*), e ϕ_{escan} é o ângulo de direcionamento elétrico do feixe na horizontal.

Em termos de tamanho de arranjo e quantidade de elementos, uma das análises realizadas no estudo em tela, a ser discutida na seção 5.4, remete aos impactos positivos na redução de valores de I/N, e consequentemente na proteção do sistema vítima, em decorrência da variação no tamanho do arranjo do sistema interferente.

No estudo em questão, adotou-se o valor típico de espaçamento (vertical e horizontal) entre elementos de $0,5 \cdot \lambda$. Considerando uma frequência média de operação de 40 GHz, um arranjo de antena teria entre seus elementos algo em torno de 3,7 mm. Embora seja um desafio pelas dimensões extremamente reduzidas, também é uma oportunidade para solução de problemas de impactos urbanísticos com pequenos painéis de antenas, além de menores tamanhos de antenas nos terminais móveis de usuários, principalmente em dispositivos IoT.

No modelo adotado (17), próprio para sistemas IMT-2020 (5G), a expressão que descreve o diagrama de radiação do arranjo composto $A_A(\theta, \phi)$ para o feixe "i", se dará conforme expressão abaixo.

$$A_{A,\text{feixe } i}(\theta, \phi) = A_E(\theta, \phi) + 10 \cdot \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{i,n,m} \cdot v_{n,m} \right|^2 \right) \quad (4.15)$$

Destaca-se que o objetivo do presente estudo não é explorar a modelagem matemática, ou o modelo de dados envolvido com o processamento de sinais do arranjo adaptativo, para mais informações são indicadas as referências (17) e (3).

Efeitos do tamanho do arranjo

O número de elementos de antena terá influência direta no formato do diagrama do arranjo. Ao dobrar o número de elementos (N), o ganho também duplica. Um arranjo uniforme, com espaçamento entre elementos igual a $0,5\lambda$, terá o valor do ganho expresso conforme abaixo (53):

$$\text{Ganho da Antena} = \text{Ganho do Elemento} + 10 \log_{10}(N) \quad \text{dB} \quad (4.16)$$

Diagrama de antena estação terrena TT&C - Rec. ITU-R S.580

O diagrama de antena de recepção da estação terrena TT&C irá influenciar diretamente na forma como o sistema interferido será impactado pela interferência cocanal. A geometria dos lóbulos secundários irá afetar diretamente a quantidade de energia recebida fora do eixo do lóbulo principal e, conseqüentemente, a potência de interferência do IMT recebida pelos lóbulos secundários da antena da estação terrena. Em estudos de coordenação, bem como para avaliação de interferência entre sistemas de radiocomunicação e estações terrenas compartilhando mesma banda de frequência, é interessante adotar um diagrama de radiação de antena de estação terrena de referência.

Tendo em vista uma enorme gama de fabricantes e produtos existentes no mercado, para as simulações realizadas neste estudo, optou-se pela utilização de um diagrama de antena da recomendação ITU-R S.580 (4). Este padrão recomenda que antenas de estações terrenas comunicando com satélites geoestacionários tenham como objetivo de projeto o ganho (G) de pelo menos 90% dos picos de lóbulos secundários não excedendo valores de ganho para os intervalos de ângulos fora de eixo do lóbulo principal, numa zona até 3° do arco de distância do arco geoestacionário, conforme figura 4.13 e abaixo.

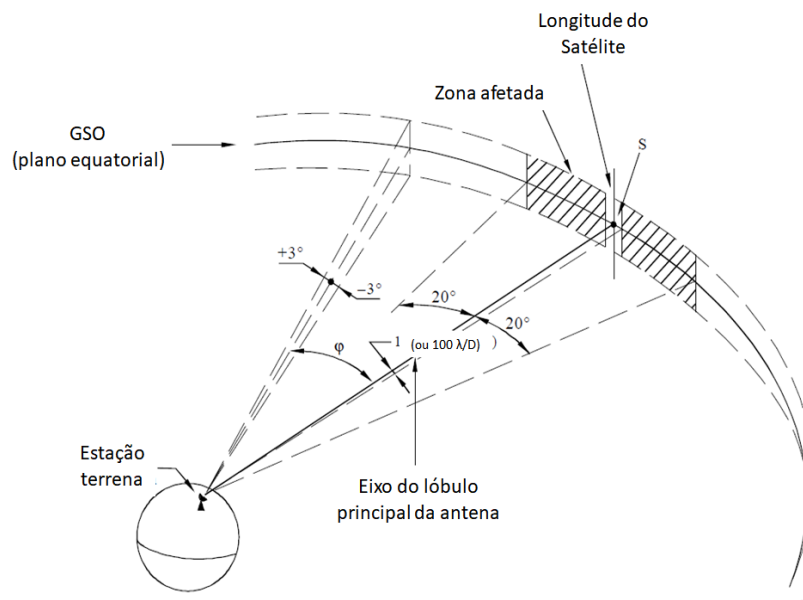


Figura 4.13: Zona ao redor do arco geo na qual os objetivos de projeto de antenas de estação terrena se aplicam (ITU-R S.580)

$*G = 29 - 25 \cdot \log(\phi)$	dB <i>i</i>	para	$1^\circ \leq \phi \leq 20^\circ$
$*G = -3,5$	dB <i>i</i>	para	$20^\circ < \phi \leq 26,3^\circ$
$*G = 32 - 25 \cdot \log(\phi)$	dB <i>i</i>	para	$26,3^\circ < \phi \leq 48^\circ$
$*G = -10$	dB <i>i</i>	para	$48^\circ < \phi \leq 180^\circ$

Onde:

G: ganho em relação a uma antena isotrópica; e

ϕ : ângulo fora de eixo do lóbulo principal, na direção do arco geoestacionário.

Para o primeiro intervalo de ângulos fora do eixo ($\phi_{fora\ eixo}$), a recomendação adotada (4) define que o limite de ganho acima se aplicará ao arco de 1° ou $100 \cdot \lambda/D$ (o que for maior) $\leq \phi \leq 20^\circ$ em qualquer direção fora do eixo do lóbulo principal. Considerando o diâmetro da antena da estação terrena TT&C de 6,1 metros, e frequência do estudo em questão 40,75 GHz, este primeiro intervalo da envoltória será entre 1° e 20° . Para ângulos (ϕ) a partir de $26,3^\circ$, aplica-se o limite estabelecido em outra recomendação, ITU-R S.465 (55).

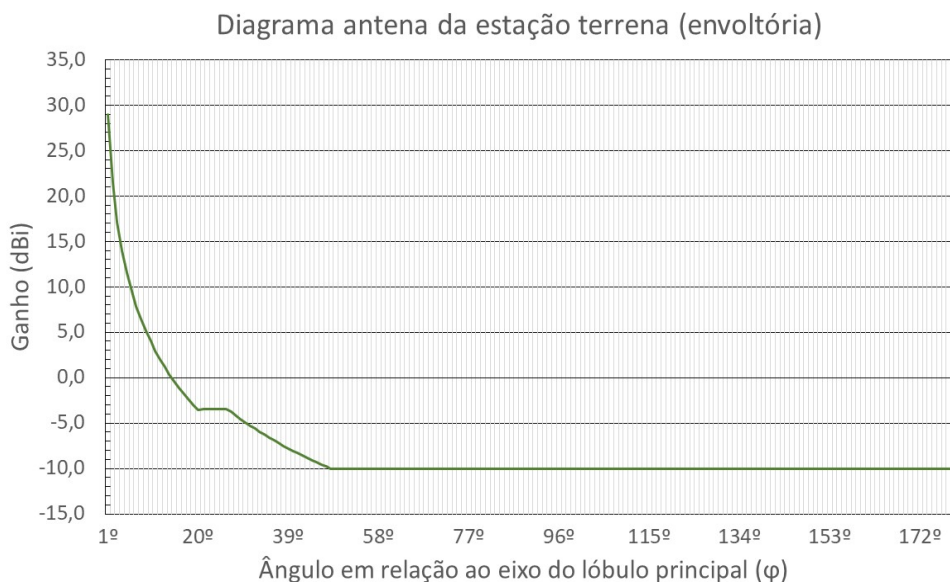


Figura 4.14: Envoltória do diagrama de antena da estação terrena (4)

As expressões de limite de ganho (4) definem basicamente uma envoltória que funciona como um balizador para as características da estação terrena, no intuito de minimizar interferências, e promover um uso mais eficiente do espectro. Tal envoltória do diagrama de recepção é apresentada na figura 4.14, sob a forma de um envelope de ganhos máximos fora do eixo considerado para a antena da estação terrena utilizada neste estudo. temas MIMO, por exemplo, permitem diversos fluxos de sinais serem usados para transmitir e receber em diversidade, bem como realizar uma multiplexação espacial, moldar o formato do feixe ou direcionamento de nulos para a fonte ou receptor indesejado. Em frequências mais altas, como a faixa de 40 GHz objeto do presente estudo, é possível o uso de antenas menores, com aumento considerável no número de elementos de antenas. Um número maior de elementos, por sua vez, permitirá gerar um feixe com formato mais estreito, reduzindo o potencial de interferências ao sistema vítima TT&C. Além disso, um maior ganho do feixe poderá superar as altas perdas de percurso típicas em altas frequências de ondas milimétricas, permitindo múltiplos fluxos para múltiplos usuários.

5 METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS OBTIDOS

Esta seção apresenta o conceito de Cinturão de Proteção TT&C e seus benefícios para solução do problema objeto do estudo em questão. Além disso, busca elucidar como a metodologia foi aplicada nas simulações de análise de interferência, explicando parâmetros de entrada aplicados e os resultados atingidos.

5.1 CONCEITO DE CINTURÃO DE PROTEÇÃO TT&C

Em um cenário tradicional de coordenação entre estação base IMT e estação terrena TT&C em operação cocanal, a solução mais simples seria estabelecer uma extensa distância de separação ao redor da estação terrena TT&C, agindo como uma espécie de "zona de silêncio", ou "zona de exclusão", onde nenhuma operação IMT seria permitida na mesma faixa de frequência. A abordagem proposta por este trabalho visa estudar formas de se proteger estações terrenas TT&C a partir de um conceito de uso mais eficiente do espectro, adotando restrições a estações base IMT operando em áreas ao redor de estações terrenas TT&C, reduzindo assim tais "zonas de silêncio".

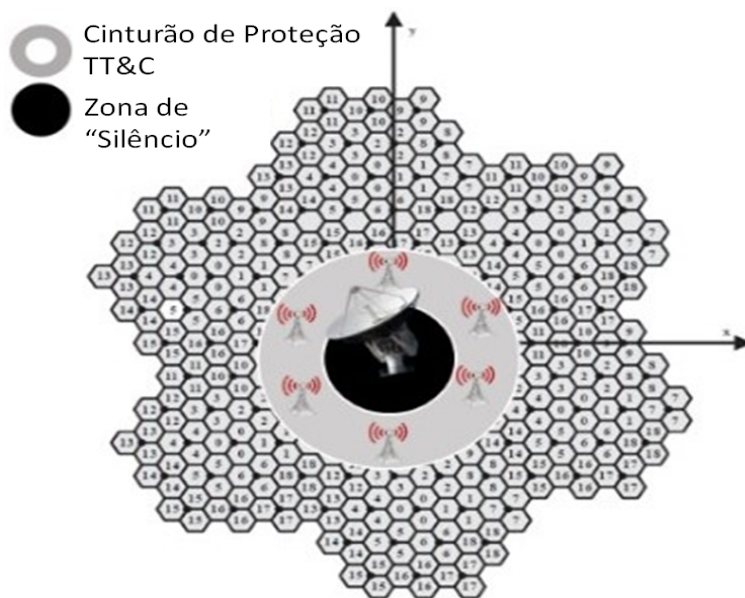


Figura 5.1: Conceito de Cinturão de Proteção TT&C (fonte: autor)

O conceito de cinturão de proteção TT&C, simbolicamente ilustrado pela figura 5.1, se beneficia das possibilidades geradas pelas técnicas de conformação de feixe de antenas e ajustes flexíveis em alguns parâmetros de RF em estações base instaladas nesta área geográfica. O modelo segue uma geometria de coroa circular, adaptando definições e modelos de trabalhos anteriores (40). O modelo de coroa utilizado no conceito de Cinturão de Proteção TT&C adapta uma abordagem apresentada por estudo anterior (40). A fim de proteger a estação terrena TT&C, promove-se a alteração de parâmetros de RF no sistema IMT

operando no Cinturão de Proteção TT&C tais como : potência por elemento de antena, tamanho de arranjo e ângulo de *downtilt*, tema a ser aprofundado nas seções subsequentes.

A figura 5.2 ilustra os parâmetros que compõem a modelagem geométrica da coroa circular do Cinturão de Proteção TT&C. O parâmetro E_z representa a distância de separação entre a estação terrena TT&C e a borda do cinturão de proteção, ou seja, da borda da coroa circular onde opera o sistema IMT em cocanal, podendo ser chamado também de "raio da zona de silêncio", ou "de exclusão". O parâmetro w representa a largura da coroa circular do Cinturão de Proteção TT&C.

Em suma, para estimar a interferência gerada por *hotspots* IMT operando no Cinturão de Proteção, o estudo irá simular o valor de interferência agregada, correspondente ao sistema IMT operando na área que compõe a coroa conforme figura 5.2. Para calcular a quantidade de estações consideradas na composição da interferência agregada, calcula-se a área da coroa circular e depois aplica-se o valor da densidade de estações a esta área, conforme abaixo.

$$A_{cinturao} = \pi(E_z + w)^2 - \pi E_z^2 \quad (5.1)$$

$$N_{estacoes} = \rho_{estacoes} \cdot A_{cinturao} \quad (5.2)$$

Onde :

$A_{cinturao}$ é a área da coroa relativa ao Cinturão de Proteção TT&C;

$N_{estacoes}$ é o total de estações IMT interferentes que operam no Cinturão; e

$\rho_{estacoes}$ é a densidade de estações IMT no Cinturão.

Cabe ressaltar que os valores a serem definidos para os parâmetros w e E_z irão variar conforme o caso concreto, em função das características da região, bem como dos requisitos técnicos de operação e performance, de ambos os sistemas, IMT e TT&C.

Apesar deste estudo concentrar na aplicação de apenas uma zona de Cinturão de Proteção próxima à estação terrena TT&C, o conceito pode ser expandido para a aplicação de várias camadas de cinturões de proteção (concêntricos) tendo a estação terrena TT&C como ponto central, cada qual possuindo raio e largura distintos. Nesta abordagem, cada cinturão poderia prover diferente nível de restrição a operação do IMT, dependendo da proximidade da borda da coroa em relação a estação TT&C.

5.2 METODOLOGIA APLICADA NAS SIMULAÇÕES

Conforme já mencionado no item 4, a fim de avaliar o cenário de compartilhamento de espectro entre a estação terrena TT&C e estações base IMT, o estudo fez uso de metodologias já consolidadas, e uma ferramenta de simulação colaborativa de código aberto desenvolvida sob liderança da Anatel, intitulada SHARC (*SHARing and Compatibility studies*) (11), e cujos parâmetros e modelagem do cenário foram

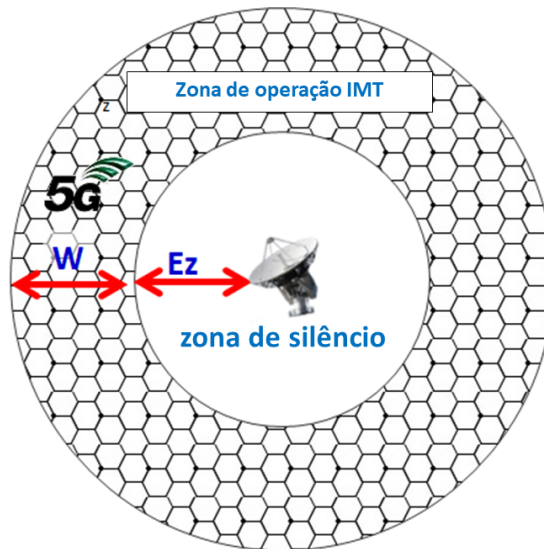


Figura 5.2: Modelo Coroa Circular - Cinturão de Proteção TT&C (fonte: autor)

adaptados ao caso do estudo em questão. Mais detalhes sobre a ferramenta são apresentados na seção 4.1.

O foco do presente estudo se dá na interferência, em cocanal, gerada pela resultante do agregado de emissões de *downlink* de estações base IMT impactando a recepção do canal de *downlink* de estação terrena TT&C (vítima), tendo em vista que esta será a fonte de interferência de maior impacto na indisponibilidade do canal de TT&C, conforme ilustrado na figura 5.3.

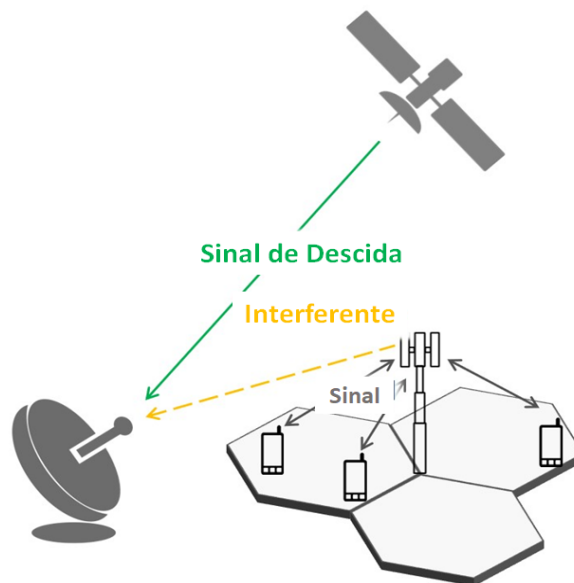


Figura 5.3: Cenário de interferência em *downlink* de estação TT&C

Um resumo dos passos de simulação, e cálculos relevantes para este cenário específico, é apresentado:

1. Geração das estações base IMT em modelo de topologia *HOTSPOT*;
2. Geração dos terminais de usuário IMT;

3. Aplicar probabilidade de fator de atividade de carga de estações base IMT;
4. Conectar terminais de usuários às estações base IMT e calcular perda de acoplamento do percurso;
5. Aplicar controle de potência e "scheduler";
6. Calcular interferência ao sistema interferido; e
7. Calcular performance de degradação I/N e CDF (Função Distribuição Acumulada);

Seguindo a mesma abordagem de estudos anteriores para esta faixa de frequência (56), e conforme apresentado na seção 4, a simulação considera modelo da Recomendação ITU-R P.452 (50) para predição de propagação do sinal interferente entre estação base IMT e a estação terrena TT&C, bem como a perda de *clutter* de acordo com a recomendação ITU-R P-2108 (45). Quanto ao modelo de canal para comunicação intra sistema IMT, considera-se o modelo UMi do 3GPP. Um dos componentes mais importantes para computar a interferência inter sistemas é o ganho das antenas de estações base na direção da estação terrena TT&C, que é diretamente afetada pelo diagrama de antena de estações base IMT resultante de expressões de conformação de feixe de antena de (17). A interferência agregada de estações base IMT na direção da estação terrena TT&C, conforme indicado no passo 6, é realizada seguindo a fundamentação apresentada na seção 4.1, e conforme (17) e (11).

$$I_{External} = \sum_j \sum_k I_{External}(TX_{BS_j}^{UE_k}, RX^{vtima}) \quad (2.1)$$

Onde:

$I_{External}(TX_{BS_j}^{UE_k}, RX^{vtima})$: Interferência "inter sistemas" gerada pelas estações base IMT BS_j (quando o k_{esimo} terminal de usuário é servido) no receptor interferido, estação terrena TT&C (RX^{vtima}); e

$I_{External}$: Interferência externa agregada em direção ao sistema interferido.

Após computar $I_{External}$, e em conjunto com o valor de potência de ruído da estação terrena TT&C, finalmente o principal indicador de performance de saída, I/N, é avaliado com uso da CDF de I/N sobre todas as amostras de fotografias da simulação. Para facilitar a visualização dos resultados em gráfico, os valores de I/N são avaliados em curvas de função de distribuição cumulativa complementar (CCDF = 1 - CDF) que indicam a probabilidade de que cada valor de I/N medido seja excedido no universo de amostras de todos os *snapshots*, ou seja, $P(I/N) > I/N_{medido}$.

A figura 5.4 ilustra os modelos de canal, propagação e de antenas aplicados no estudo.

CDF (Função de Densidade Cumulativa) da razão Interferência-Ruído (I/N) agregada

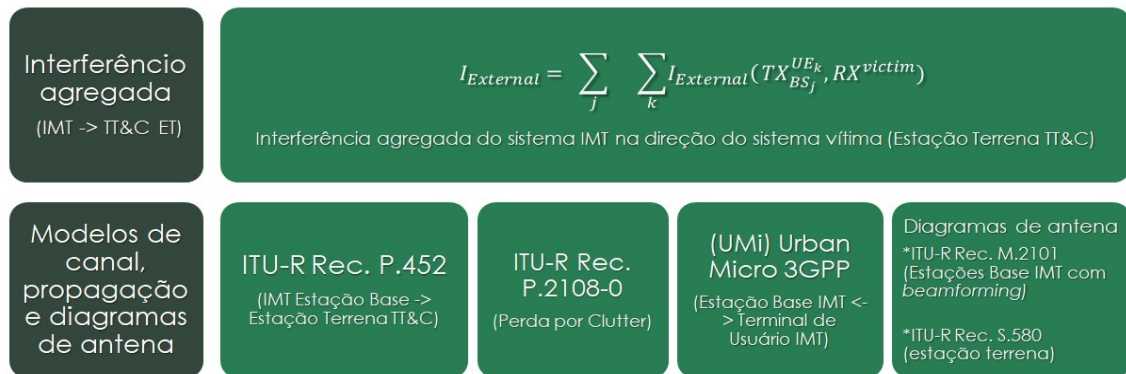


Figura 5.4: Sumário de cálculos, modelos de propagação, canal e diagramas de antena

5.3 PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO

O estudo de compartilhamento para avaliar a interferência gerada pelo IMT-2020 sobre o canal de *downlink* da estação terrena TT&C na banda de 40 GHz será realizado através de simulação da interferência agregada, gerada por todas as estações base IMT ao redor do sistema "vítima".

Conforme já foi apresentado, a interferência agregada é traduzida em um valor de I/N, o qual é comparado a um dado critério de proteção definido como parâmetro adequado para avaliar o nível de interferência ao sistema vítima em diferentes percentuais de tempo. Quando o valor de I/N excede o critério de proteção, assume-se que a proteção não é garantida, e a interferência pode ocorrer, do contrário não é provável que o sistema vítima seja interferido. Os parâmetros de referência para a estação terrena TT&C de um satélite geostacionário e das estações radio base IMT, utilizados como dados de entrada para a ferramenta de simulação (11), são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Configuração de referência para o canal de *downlink* da estação terrena TT&C

Parâmetros Estação Terrena TT&C	
Frequência Central	40,750 GHz
Largura de Banda do canal	1 MHz
Altura da Antena	6 m
Diâmetro da antena	6,1 m
Ganho de antena (pico)	66,1 dBi
Diagrama de antena	Rec. ITU-R S.580 (4)
Elevação de antena	50 graus
Temperatura de ruído	250 K
Critério de Proteção I/N Max.	-12,2 dB

Os parâmetros de entrada da estação terrena TT&C, sistema vítima, são coletados de estudos anteriores realizados no âmbito da UIT (41) (56) (57). Em relação ao critério de proteção, existem diferentes abordagens sobre requisitos para proteção de redes do Serviço Fixo por Satélite, incluindo valores de curto e longo prazos.

A referência mais relevante (58) se baseia em percentuais de tempo, probabilidade ou locais para os quais o valor de I/N pode ser excedido, e estabelece +8 dB (0,02%), -6 dB (1%) e -10,5 dB (20% ou média de I/N). Como estamos lidando com uma aplicação crítica (TT&C), e a fim de promover uma maior proteção, um critério mais conservador de -12,2 dB foi adotado como base para as análises presentes neste estudo. No entanto, é importante ressaltar que o assunto merece maiores discussões.

Para o sistema IMT-2020, agindo como "interferente", nas simulações iniciais adota-se uma configuração de referência, representando uma operação presumidamente regular, sem restrições adicionais para proteger estação terrena TT&C de interferência cocanal. Um grupo de parâmetros de sistema IMT e modelos de propagação adotados são baseados naqueles recomendados para estudos de compartilhamento e compatibilidade de espectro (56) (15), conforme apresentado no capítulo 4. A fim de permitir comparabilidade, alguns valores adotados como parâmetros de entrada são similares aos adotados em estudos anteriores (41), realizados com a mesma ferramenta de simulação (11). A tabela 5.2 apresenta um resumo dos principais parâmetros usados para o cenário de referência do IMT.

Tabela 5.2: Configuração de referência para o enlace de *downlink* do IMT

Parâmetros IMT-2020 (<i>Cluster</i>)	
Parâmetros de transmissão da estação base (BS)	
Frequência Central	40,750 GHz
Método Duplex	TDD
Largura de banda do canal	200 MHz
Largura de banda do sinal	>90% do canal
Diagrama de antena	ITU-R M.2101 (17)
Arranjo de antena	8x16 elementos
Ganho por elemento	5 dBi
Relação frente-costa por elemento	-12,2 dB
Largura de Feixe 3 dB horizontal e vertical por elemento	30°
Potência conduzida por elemento de antena	8 dBm/200 MHz
Relação frente-costa por elemento	30 dB
Implantação (<i>hotspot outdoor</i>) urbano	
Densidade de <i>hotspots</i>	30 BS/km ²
Altura de antena	6m
Fator de carga de rede	50%
Equipamentos de Usuário por célula	3
Características de terminal de usuário (UE)	
Densidade de terminais de usuário	100 UE/km ²
Diagrama de antena	ITU-R M.2101 (17)
Arranjo de antena	4x4 elementos
Ganho por elemento	5 dBi
Figura de Ruído	12 dB

A fim de medir os efeitos positivos em termos de I/N, primeiro foram realizadas simulações usando os

parâmetros de RF relativos a configuração de referência para o enlace de *downlink* do IMT. Em seguida, novas novas simulações foram realizadas, após variar alguns dos parâmetros de RF do IMT, a fim de avaliar a redução de interferência sobre a estação terrena TT&C, em decorrência de restrições aplicadas ao IMT. Cada simulação realiza 5.000 fotografias (*snapshots*), e as CCDF de I/N sobre o sistema vítima quantifica a probabilidade de, para uma fotografia, o critério de proteção da estação terrena TT&C ser excedido, e nesses casos, considera-se que a estação terrena TT&C pode sofrer interferência prejudicial. A topologia de *hotspots* IMT é a mais provável de ser adotada para esta faixa de frequência. A posição das estações base IMT-2020, e terminais de usuário, na simulação seguem distribuições aleatórias em cada fotografia de simulação, conforme recomendado por (17). Em modelagens de estudos anteriores (41), a interferência gerada no sistema vítima (ex: estação terrena do FSS) foi avaliada através do calculo de interferência agregada gerada pelos *hotspots* implantados dentro de um *cluster* IMT com 57 células concentradas em uma área de 1,9 km². Os *hotspots* são distribuídos uniformemente, um por célula, e localizados de forma aleatória. Macro células não são consideradas pois operam em baixas frequências. Os terminais de usuário são distribuídos dentro da área de cobertura do *hotspot* seguindo distribuição *Rayleigh*, com parâmetro de escala $\sigma_d = 32m$ para a distância entre terminais de usuário e estação base *hotspot*, e distribuição Normal para o azimute entre ambos, truncado no range $\pm 60^\circ$, com média $\mu_a = 0^\circ$ e desvio padrão $\sigma_a = 30^\circ$.

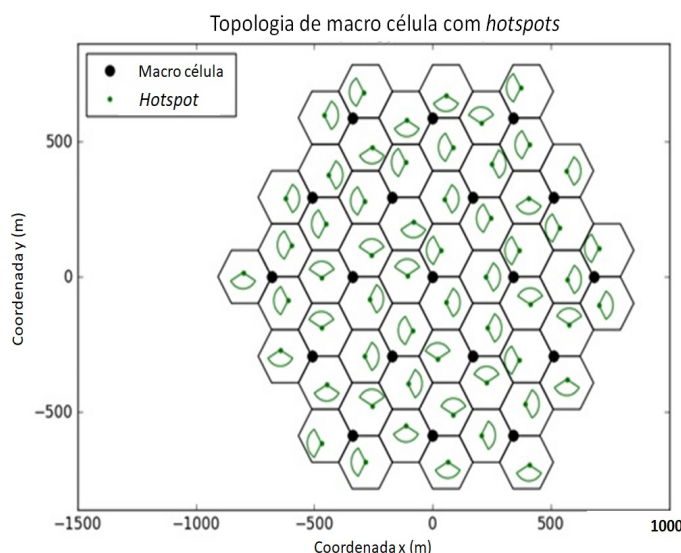


Figura 5.5: Cluster de hotspots distribuídos em uma fotografia (*snapshot*) da simulação

A fim de estimar a interferência agregada gerada pelos *hotspots* IMT instalados em uma área específica ao redor da estação terrena TT&C, em formato de "cinturão", o modelo de *cluster* foi adaptado para atender à modelagem geométrica de uma coroa circular, conforme introduzido na seção 5.3, figura 5.2. Conforme apresentado na seção, um fator de segmento foi aplicado (40) a fim de adaptar a topologia de *cluster* à área de uma coroa, para uma estimativa de interferência gerada por *hotspots* IMT no cinturão de proteção. Uma distância de separação E_z de 150 m, também intitulada raio zona de silêncio entre a estação TT&C e a borda interna do cinturão de proteção, define a região onde nenhum *hotspot* IMT é implantado na mesma frequência de operação da estação terrena TT&C. Também foi definida a largura do cinturão w de 1,7 m, conforme a figura 5.2.

5.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Definição do foco da análise dos cenários de interferência

Inicialmente, busca-se verificar qual é o enlace dominante no cenário interferente (*uplink* ou *downlink*). Para tal, simula-se o impacto do agregado de emissões interferentes de *uplink* do sistema IMT, ou seja, geradas pelos terminais móveis, em comparação com aquelas geradas pelo agregado dos enlaces de *downlink* das estações base IMT sobre a estação terrena TT&C. Para fins de comparação, na simulação de *uplink* adotou-se o mesmo cenário de referência utilizado para a simulação do enlace de *downlink*, aplicando um distanciamento E_z de 150 m e os parâmetros conforme a tabela 5.2. De acordo com o gráfico da figura 5.6 a seguir, constata-se que o enlace de *downlink* é o dominante na análise da interferência.

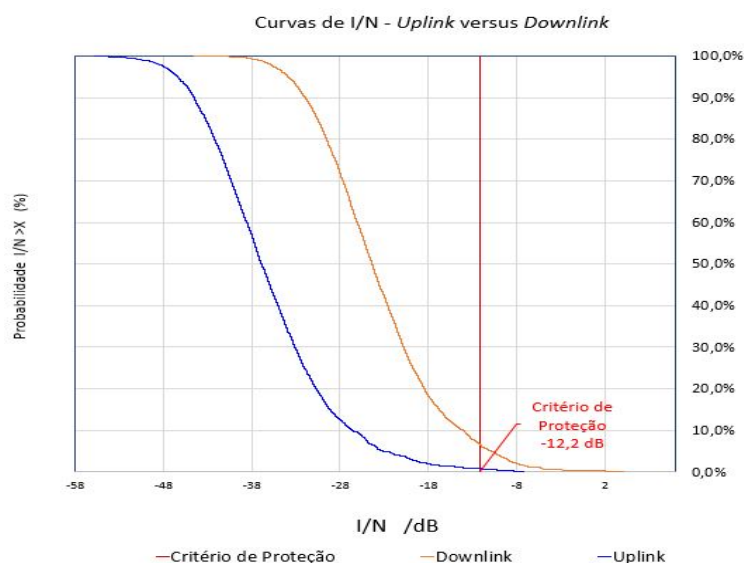


Figura 5.6: *Uplink* vs *Downlink* para distância de 150 m de separação da estação TT&C até a borda do cinturão.

Apesar da menor quantidade de estações base em relação a de terminais de usuários, a potência de saída da estação base é superior à do terminal de usuário, Sendo assim, o estudo concentra-se apenas na interferência de *downlink* do IMT por ser mais prejudicial no cenário de interferência cocanal.

Neste sentido, além de variar a distância E_z entre a estação terrena TT&C e a borda interna do cinturão de proteção, os seguintes parâmetros de estações base IMT foram avaliados:

- Número de elementos do arranjo de antena de estação base IMT (linhas e colunas);
- Potência conduzida por elemento de arranjo de antena da estação base IMT; e
- Ângulo de *Downtilt* da estação base IMT

Uma grande vantagem de se promover ajustes em estações base é que seria muito mais complexo customizar modificações em dispositivos terminais, os quais possuem ordem de grandeza na casa de bilhões unidades, Isso representaria um aumento do custo de fabricação e, conseqüentemente, maiores preços ao consumidor final.

Distância de separação entre estação TT&C e borda interior do Cinturão de Proteção

O primeiro parâmetro avaliado é a distância de separação E_z entre a estação terrena TT&C, e a borda interna do cinturão de proteção. Em simulações iniciais, adotadas como referência, foram utilizados parâmetros das tabelas 5.2 e 5.1, bem como as distâncias de separação de 0 m, 150 m, 300 m e 500 m.

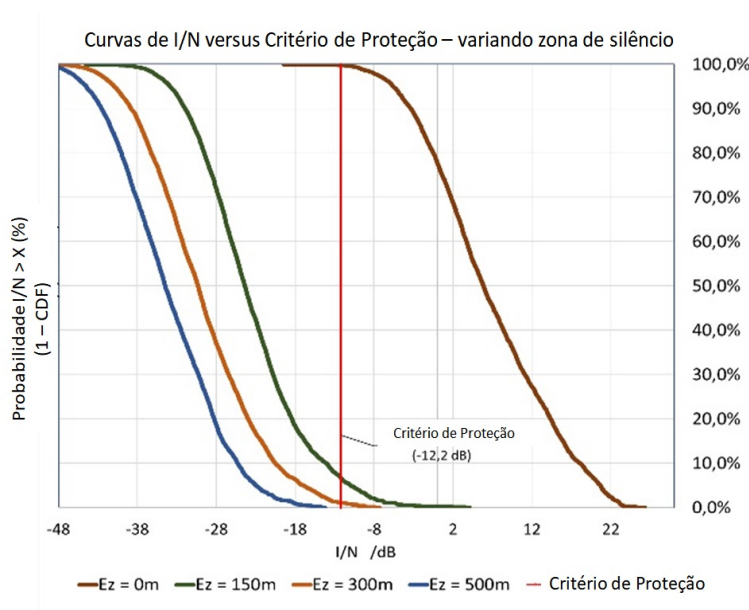


Figura 5.7: Curvas de I/N para 0 m, 150 m, 300 m e 500 m

Os resultados indicaram que o critério de proteção (I/N) foi excedido em 99,76% dos *snapshots* para 0m e 6,7% para 150 m considerando a interferência agregada gerada pela mesma quantidade de estações base IMT. Simulações com 300 m e 500 m indicaram 1% e 0% de *snapshots* com critério de proteção excedido, respectivamente, e conforme figura 5.7. Este resultado confirma que, quando grandes distâncias de separação são adotadas, o critério de proteção de I/N é facilmente alcançado. No entanto, isto leva a um uso mais ineficiente do espectro tendo em vista que o IMT não poderia operar em uma zona de silêncio maior.

Com base nisso, o presente trabalho passa a avaliar cenários considerando uma distância de separação de 150 m, porém onde aproximadamente 7% dos *snapshots* ainda excedem o critério de proteção I/N. Este valor pode ser considerado alto, sendo assim insuficiente para proteger um serviço de tal criticidade como TT&C. Neste contexto, percebe-se que a maior parte do problema a ser resolvido concentra-se ao redor deste percentual de casos que apresentam I/N mais alto, e onde oportunidades para uma camada de cinturão de proteção podem ser investigadas.

Tamanho de arranjo de antena das estações base IMT (elementos em linhas e colunas)

O resultado das simulações indicou diferentes curvas de I/N para cada tamanho de arranjo de antena simulado (8x8, 8x16, 16x32, 32x64 e 64x128), conforme a figura 5.8. Para melhor visualização, o gráfico da figura 5.8 foi concentrado no comportamento sobre as 20% amostras com maiores valores de degradação de I/N. Adicionalmente, a tabela indica o percentual de casos onde I/N excede o critério de proteção para cada configuração de tamanho de arranjo de antena.

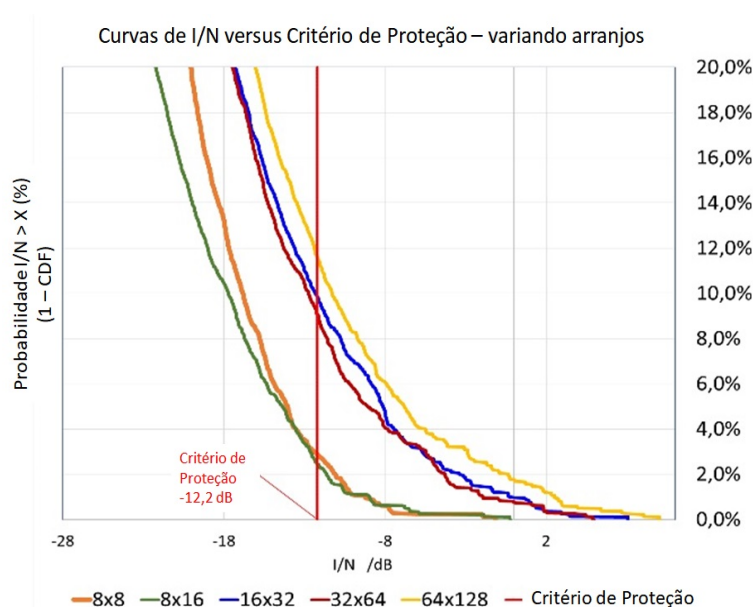


Figura 5.8: Curvas de I/N para diferentes arranjos de antena da estação base IMT

Tabela 5.3: % de casos em que critério de proteção é excedido para diferentes arranjos de antena de estação base

Tamanho arranjo	% casos em que I/N excede o critério de proteção
8x8	2,86%
8x16	6,72%
16x32	9,84%
32x64	9,04%
64x128	11,62%

É importante ter em mente que um número maior de elementos no arranjo de antena da estação base IMT irá aumentar o ganho do arranjo, e também a potência de RF entregue ao arranjo, levando a um valor mais alto de EIRP (*effective isotropic radiated power*), que contribui para o aumento no percentual de casos em que o critério de proteção I/N é excedido. Em situações de eventos de alinhamento, ou seja, quando o lóbulo principal da conformação de feixe da antena da estação base IMT aponta diretamente, e sem obstáculos, para a direção da estação terrena TT&C, a interferência será maior do que aconteceria com um arranjo menor. Entretanto, diferentes formatos de diagrama de radiação de antena resultantes desses arranjos também irão influenciar no comportamento de interferência e podem compensar (até certa medida) os efeitos negativos do aumento da EIRP.

Para melhores esclarecimentos em relação aos efeitos do tamanho do arranjo, as figuras 5.9 e 5.10

apresentam curvas de CDF do ganho da antena na direção da estação terrena TT&C e os diagramas de radiação resultantes de diferentes tamanhos de arranjos, respectivamente, geradas pela ferramenta de simulação utilizada (11). Conclui-se que, uma vez adotadas diferentes configurações de arranjo de antena, ajustes cuidadosos podem ser necessários em outros parâmetros, dependendo do objetivo almejado.

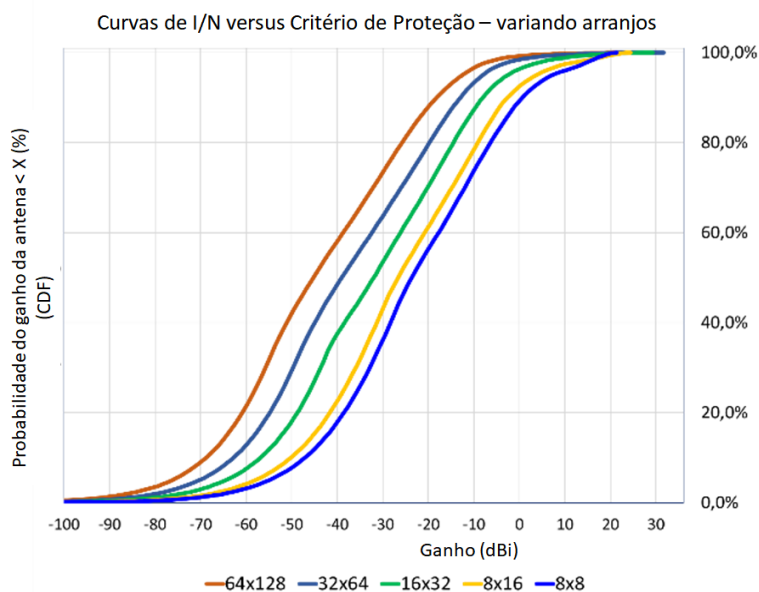


Figura 5.9: CDF do ganho de antena da estação base IMT em direção à estação TT&C para diferentes arranjos

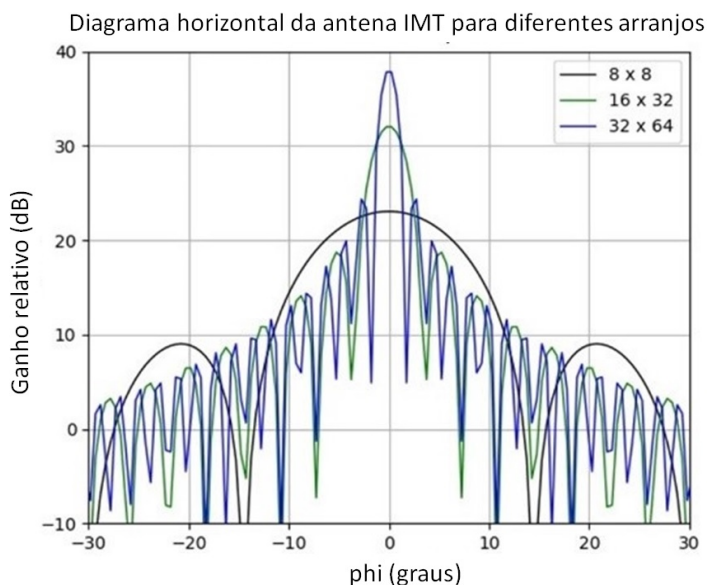


Figura 5.10: Diagramas de radiação de antena para diferentes arranjos

Potência conduzida por elemento do arranjo de antena da estação base IMT

Uma redução de 3 dB na potência conduzida por elemento do arranjo de antena resultou em redução de 3,12% em casos em que o critério de proteção é excedido em relação à configuração de referência (arranjo 8x16), conforme figura 5.11.

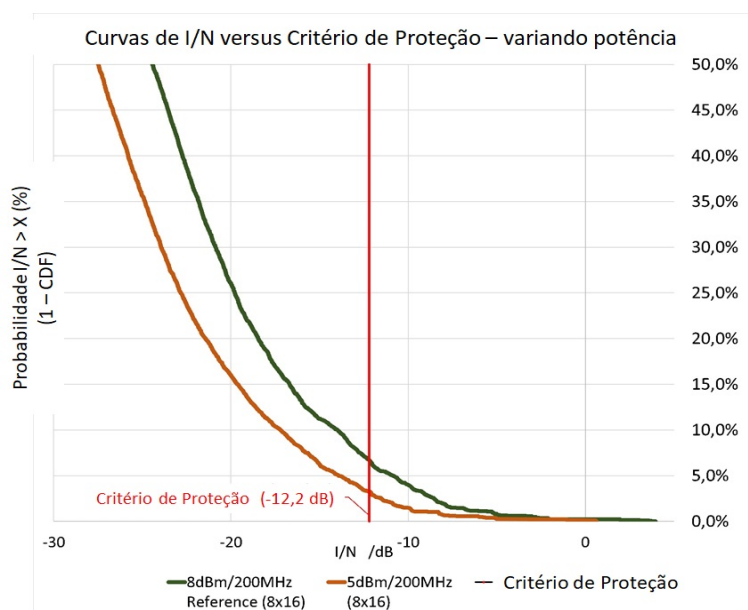


Figura 5.11: Curvas de I/N para 8 dBm / 200 MHz e 5 dBm / 200MHz (-3 dB) por elemento

A tabela 5.4 demonstra que os diferentes tamanhos de arranjos de antena terão diferentes respostas devido a diferentes composições de diagramas de antena, características de ganho e EIRP.

Tabela 5.4: % redução de casos em que critério de proteção é excedido após redução de 3 dB de potência por elemento

Tamanho do arranjo	% redução de casos em que I/N excede o critério de proteção
4x8	0,14%
8x16	3,12%
16x32	3,54%
32x64	3,92%

Ângulo de *downtilt* de antena de estação base IMT

O cenário de referência foi simulado com um ângulo de *downtilt* de 10 graus para as antenas de *hotspots* IMT. Em seguida, simulações foram realizadas aplicando-se 20 graus de *downtilt* mantendo fixas as demais configurações de referência.

Os resultados indicaram uma redução de aproximadamente 1% de casos em que o I/N excede o critério de proteção, conforme figura 5.12. Da tabela 5.5, pode ser concluído que a melhoria da curva de I/N em decorrência de um acréscimo de 10 graus no ângulo *downtilt* possui uma relação íntima com os tamanhos do arranjo de antena. O arranjo 8x16 apresentou um melhor resultado.

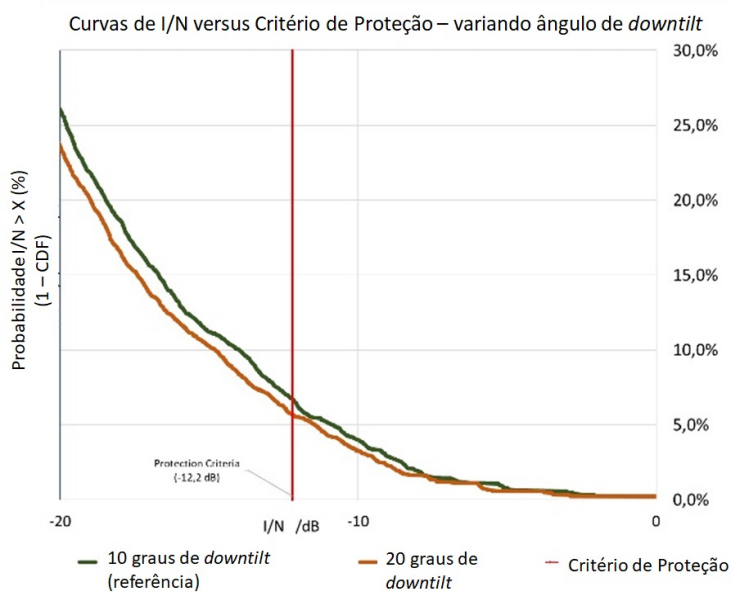


Figura 5.12: Curvas de I/N para 10 e 20 graus de *downtilt* da antena da estação base IMT

Tabela 5.5: de redução de casos em que critério é excedido com 10 graus de *downtilt* de antena da estação base IMT

Tamanho do arranjo	% redução de casos em que I/N excede o critério de proteção
8x8	0,56%
8x16	1,16%
16x32	0,78%
32x64	0,36%

Cenário adicional simulado

Em um último cenário foram simuladas variações dos diferentes parâmetros (tamanho de arranjo, potência por elemento e ângulo de *downtilt*) de maneira combinada. A figura 5.13 apresenta resultados para as diferentes variações de configurações de Cinturão de Proteção TT&C, combinando diferentes valores para os parâmetros de interesse, a fim de se reduzir o percentual de I/N que excede o critério de proteção em relação ao cenário de referência.

Apresentaram os melhores resultados para a configuração da estação base IMT operando no Cinturão (curva em azul) os seguintes parâmetros : arranjo 8x8, potência por elemento 5 dBm/200MHz e 20 graus de ângulo de *downtilt*. O resultado indicou que apenas 0,22% dos casos excederam o critério de proteção I/N.

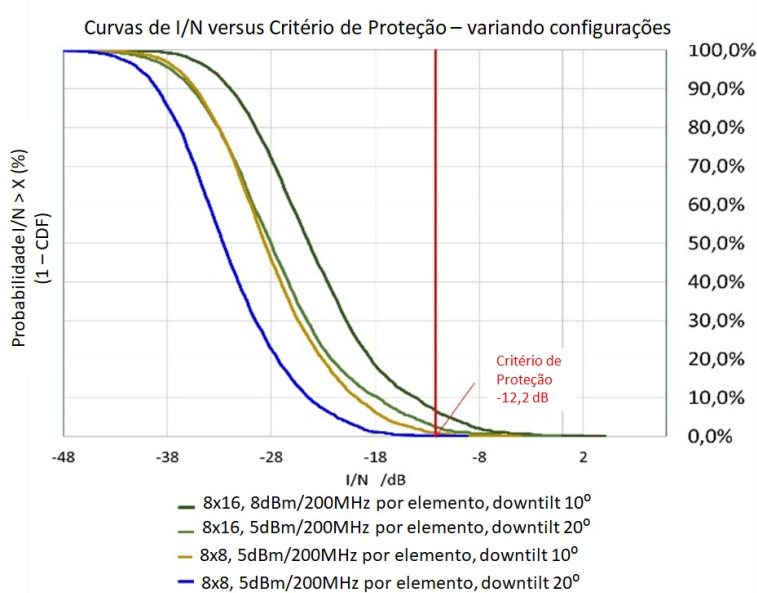


Figura 5.13: Curvas de I/N para diferentes configurações de cinturões de proteção TT&C

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta a conclusão do trabalho, especialmente no que tange a viabilidade de aplicação do conceito de Cinturão de Proteção TT&C. Também indica áreas para trabalhos futuros no tema.

Conforme os resultados apresentados, o estudo conclui que existem alternativas possíveis para a implementação de uma camada geográfica, referenciada neste trabalho ao conceito de "Cinturão de Proteção", onde estações base IMT-2020 (5G) poderiam operar com uma configuração mais restritiva, a fim de prevenir interferências cocanal a estação terrena TT&C na faixa de 40 GHz. A aplicação deste conceito se apresenta como uma solução efetiva para proteção do canal TT&C, o qual pode ser considerado como parte de uma infraestrutura crítica de comunicação, e servir como ferramenta para convivência em um contexto de busca pelo uso eficiente do espectro. O "Cinturão de Proteção" visa proteger as comunicações TT&C contra radiointerferências prejudiciais, ao mesmo tempo que reduz a necessidade de uma extensa zona de silêncio ao redor da estação TT&C, viabilizando a operação do 5G em faixas de frequência compartilhada entre os dois sistemas.

Simulações realizadas com a aplicação de distâncias de separação mais amplas entre a estação terrena TT&C e a borda interna do Cinturão de Proteção, conforme indicado na figura 5.2, confirmaram que a forma mais efetiva de prevenir a interferência cocanal gerada pelo agregado de estações base IMT é através do maior distanciamento do agrupamento das estações IMT em relação à estação TT&C. No entanto, isto leva a uma maior "zona de silêncio", onde a faixa de frequência não pode ser utilizada pelo IMT. A fim de promover um uso mais eficiente do espectro em 40 GHz, é possível reduzir esta distância através da promoção de um "ajuste fino" nos parâmetros das estações base IMT implantadas em uma área ao redor da estação TT&C, conceito aqui chamado de "Cinturão de Proteção". Em cenários específicos deste estudo, bons resultados foram obtidos para distâncias de separação reduzida a 150 m. Isto pode ser atingido pela combinação de ajustes em parâmetros de antena de estações base IMT, tais como tamanhos de arranjo, redução na potência conduzida por elemento do arranjo, bem como aumento do ângulo de *downtilt*. Quando adotados tais ajustes, verificou-se que, previne-se até cerca de 10% dos casos em que o valor de I/N excede o critério de proteção. Se tais ajustes não fossem adotados, para obter a mesma performance de proteção, seria necessário uma maior "zona de silêncio", também chamada de "zona de exclusão".

É importante destacar novas oportunidades para abordagens inovadoras de coordenação de espectro nas bandas Q/V. Devido às suas características físicas, e dependendo dos requisitos dos serviços envolvidos, menores esforços de proteção serão necessários para promover seu uso compartilhado em relação ao que seria necessário em bandas de frequências mais baixas. Soluções interessantes são esperadas e, em um cenário de coordenação de espectro mais refinado, alguns dos parâmetros para estações base IMT operando dentro de um cinturão de proteção TT&C poderiam ser objeto de acordos de coordenação desenvolvidos em conjunto entre operadoras móveis 5G e operadoras de satélites. Embora não tenha sido sujeito a simulações realizadas neste estudo, pode ser entendido de (49) que, devido às perdas de penetração em edificações particularmente altas na faixa de 40 GHz, haveria novas oportunidades para combinar estruturas construídas com muro de concreto como implementação de blindagem do lado do operador de satélite a fim de melhorar ainda mais a proteção de sua estação terrena TT&C.

Trabalhos adicionais também devem ser promovidos para avaliar os resultados de simulações de impacto de cinturões de proteção mais extensos, ou diferentes cinturões de proteção concêntricos, operando de maneira combinada em camadas, e representando maiores áreas urbanas ou suburbanas. Com isso, eventualmente outros modelos de canal móvel também poderiam ser aplicados ao estudo.

Ademais, o conhecimento nesta área poderia ser ampliado a partir de estudos de técnicas de mitigação para redução do impacto agregado em estações terrenas TT&C conectando a satélites não geoestacionários, com outros ângulos de elevação, em relação ao impacto de emissões indesejadas do IMT em faixas adjacentes e novas técnicas para ângulos de esquiva (*avoidance angles*) a fim de reduzir eventos de visada direta entre diagrama de radiação do arranjo de antena de estações base IMT e a estação terrena TT&C, além de técnicas de cancelamento de lóbulo secundário de antenas.

Este é um estudo com objetivos acadêmicos, com base em cenários simulados. Para implementações reais, outros fatores podem influenciar os resultados, e abordagens de teste de campo também são recomendadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HAYKIN. *Simon Haykin, Communication Systems, 4th edition*. 2001. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Communication-Systems-Simon-Haykin/dp/0471178691>>.
- 2 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.341-7 - The concept of transmission loss for radio links*. 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.341/en>>.
- 3 3GPP. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; 3GPP TR 37.840 V12.1.0 (2013-12) Study of Radio Frequency (RF) and Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements for Active Antenna Array System (AAS) base station (Release 12)*. 2012. Disponível em: <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2624>>.
- 4 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R S.580-6 - Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites*. 2018. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.580-6-200401-I!!PDF-E.pdf>.
- 5 ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações, Resolução nº 656, de 17 de agosto de 2015, Aprova o Regulamento sobre Gestão de Risco das Redes de Telecomunicações e Uso de Serviços de Telecomunicações em Desastres, Situações de Emergência e Estado de Calamidade Pública*. 2015. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2015/831-resolucao-656>>.
- 6 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R M.2083 “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>>.
- 7 ITU. *International Telecommunication Union. Radio Regulations (RR)*. 2020. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2020&media=electronic>>.
- 8 ITU-R. *International Telecommunication Union. Report ITU-R M.2101 “Guidance on the regulatory framework for national spectrum management”*. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2093>>.
- 9 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R S.1716 “Performance and availability objectives for fixed-satellite service telephony, tracking and command systems”*. 2005. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-S.1716/en>>.
- 10 PRATA, R.; LINHARES, A.; TIMÓTEO, R.; QUEIROZ, C.; SOUZA, E.; BAKAUS, T. Protecting satellite downlink tracking and telemetry channels by imt-2020 5g base stations protection belts surrounding satellite tt&c earth stations operating in the 40 ghz band. In: *ettc2020 - European Test and Telemetry Conference 2020, 2020-06-23 - 2020-06-25, Virtual Conference*. [S.l.: s.n.], 2020. chapter 7. Spectrum management Coding, n. ISBN: 978-3-9819376-3-3; DOI: 10.5162/ettc2020/7.4, p. 220–229.
- 11 ITU-R. *International Telecommunication Union. ITU-R, Study Group 5, Working Party 5D - An Open Source Implementation of Recommendation ITU-R M.2101*. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/oth/ROA0600007A/en>>.
- 12 ANATEL. *Simulações de Convivência IMT-2020 em Redes Privativas e FSS (3,7-3,8 GHz) apresentado na 7a Reunião Extraordinária do Comitê de Uso do Espectro e Órbita (CEO) da Anatel, agosto, 2020 - SEI 53500.040401/2020-80*. 2020. Disponível em: <<https://antigo.anatel.gov.br/setorregulado/reunioes-do-ceo>>.

- 13 ANATEL. *Apresentação Dados coletados sobre ocupação da Banda C - apresentado na 52ª Reunião Ordinária do Comitê de Uso do Espectro e de Órbita (CEO) da Anatel, maio, 2020 - SEI 53500.021558/2020-14 - Doc. SEI 5592765*. 2020. Disponível em: <<https://antigo.anatel.gov.br/setorregulado/reunioes-do-ceo>>.
- 14 ORFANIDIS, S. J. *Electromagnetic Waves and Antennas - Rutgers University*). 2016. Disponível em: <<https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>>.
- 15 ITU-R. *International Telecommunication Union. Working Party 5D – TG 5/1 [36] attachment 2 - 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*. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0036/en>>.
- 16 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R M.1645 “ Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000”*. 2003. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1645/en>>.
- 17 ITU-R. *International Telecommunication Union. 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>>.
- 18 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: *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- 19 ISO. *ABNT NBR ISO 31000:2018 - Gestão de Riscos - Diretrizes*. 2018. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=392334>>.
- 20 DSIC/GSI. *Gabinete de Segurança Institucional/Departamento de Segurança da Informação e Comunicações - Norma Complementar 10/IN01/DSIC/GSIPR*. 2012. Disponível em: <http://dsic.planalto.gov.br/legislacao/nc_10_ativos.pdf>.
- 21 INTELSAT. *INTELSAT CORPORATE COMMUNICATIONS - Intelsat Reports Intelsat 29e Satellite Failure*. 2019. Disponível em: <<https://www.intelsat.com/newsroom/intelsat-29e-satellite-failure/>>.
- 22 SPACENEWS. *Space News - Intelsat-29e declared a total loss*. 2019. Disponível em: <<https://spacenews.com/intelsat-29e-declared-a-total-loss>>.
- 23 SWF. *Secure World Foundation*. 2020. Disponível em: <<https://swfound.org/>>.
- 24 GVF. *Global VSAT Forum*. 2020. Disponível em: <<https://gvf.org/>>.
- 25 SDA. *Space Data Association*. 2020. Disponível em: <<https://www.space-data.org/sda/>>.
- 26 ISAC. *Information Sharing and Analysis Center*. 2020. Disponível em: <<https://s-isac.org/>>.
- 27 SATELLITE2020. *Painel- Global Vsat Forum Cybersecurity Session - Defining New Cybersecurity and Network Threat Ecosystem*. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fkK7XCI7voM>>.
- 28 WANG, G.; WEI, S.; CHEN, G.; TIAN, X.; SHEN, D.; PHAM, K.; NGUYEN, T.; BLASCH, E. Cyber security with radio frequency interferences mitigation study for satellite systems. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 98380K.

- 29 FCC. *Federal Communications Commission - FCC Authorizes SpaceX to Provide Broadband Satellite Services*. 2018. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/document/fcc-authorizes-spacex-provide-broadband-satellite-services>>.
- 30 FCC. *Federal Communications Commission - FCC Authorizes Kuiper Satellite Constellation*. 2020. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/document/fcc-authorizes-kuiper-satellite-constellation>>.
- 31 ITU. *International Telecommunication Union. Radio Regulations 2020 - Vol III - Resolution 769 (WRC-19) - Protection of geostationary fixed-satellite service, broadcasting-satellite service and mobile-satellite service networks from the aggregate interference produced by multiple non-geostationary fixed-satellite service systems in the frequency bands 37.5-39.5 GHz, 39.5-42.5 GHz, 47.2-50.2 GHz and 50.4-51.4 GHz*). 2020. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2020&media=electronic>>.
- 32 ITU. *International Telecommunication Union. Radio Regulations 2020 - Vol III - Resolution 770 (WRC-19) - Application of Article 22 of the Radio Regulations to the protection of geostationary fixed-satellite service and broadcasting-satellite service networks from non-geostationary fixed-satellite service systems in the frequency bands 37.5-39.5 GHz, 39.5-42.5 GHz, 47.2-50.2 GHz and 50.4-51.4 GHz*. 2020. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2020&media=electronic>>.
- 33 GUARDIAN. *Jordan denies illegal jamming of al-Jazeera World Cup TV*. 2010. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/media/2010/sep/30/al-jazeera-world-cup-jordan>>.
- 34 GUARDIAN. *Jamming of soccer World Cup TV broadcasts traced to Jordan — Report*. 2010. Disponível em: <<https://nypost.com/2010/09/30/jamming-of-soccer-world-cup-tv-broadcasts-traced-to-jordan-report/>>.
- 35 ALJAZEERA. *Satellite Jamming - Al Jazeera Documentary*. 2010. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=St9kKCtpGYA>>.
- 36 ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações, Resolução nº 671, de 3 de novembro de 2016, Aprova o Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências e altera o Regulamento de Cobrança de Preço Público pelo Direito de Uso de Radiofrequências e o Regulamento de Aplicação de Sanções Administrativas*. 2016. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2016/911-resoluç~ao-671>>.
- 37 FBI. *Federal Bureau of Investigation, Cyber Division - Public Industry Notification - VSAT Signals Vulnerable to Low-Cost Device Exploitation*. 2020. Disponível em: <<https://www3.waldenu.edu/-/media/Walden/files/about-walden/comt/school-of-information-systems-and-technology/vsat-signals-vulnerable-to-low-cost-device-exploitation.pdf?la=en>>.
- 38 IEEE. *IEEE Xplore*. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/search/advanced>>.
- 39 QUEIROZ, C.; VIEIRA, R.; BARRETO, A. N.; ZARREBINI, A.; SOUZA, E.; LINHARES, A. New spectrum bands for haps: Sharing with fixed-satellite systems. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- 40 ITU-R. *International Telecommunication Union. Working Party 5D – TG 5/1 Doc. 435 - Update on the Sharing and compatibility study between RAS in the 42.5-43.5 GHz frequency band and IMT systems operating in the 37-43.5 GHz frequency band*. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/meetingdoc.asp?lang=en&parent=R15-TG5.1-C-0435>>.
- 41 ITU-R. *International Telecommunication Union. Task Group 5/1 Doc. 436 - Brazil - Update on sharing and compatibility study between IMT systems and fixed-satellite service (Space-to-Earth) in the 37-42.5 GHz frequency band*. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0436/en>>.

- 42 ANATEL. *Relatório de Estudos de Convivência entre o IMT 2020 e TVRO - apresentado na 52ª Reunião Ordinária do Comitê de Uso do Espectro e de Órbita (CEO) da Anatel, maio, 2020 - SEI 53500.021558/2020-14*. 2020. Disponível em: <<https://antigo.anatel.gov.br/setorregulado/reunioes-do-ceo>>.
- 43 TEIXEIRA, F. P. A. *Análise da Coexistência entre Sistemas 5G e Serviços Fixos na Faixa de Ondas Milimétricas. Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa*. 2019. 70 f. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém*. 2019. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/12169>>.
- 44 ECO. *European Communications Commission - SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool)*. 2019. Disponível em: <<http://www.ero.dk/seamcat>>.
- 45 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.2108 - Prediction of Clutter Loss*. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108/en>>.
- 46 CHALFANT, T. *Ninja telemetry amt survival in a congested spectral environment. ettc2018 - European Test and Telemetry Conference 2018-06-26 - 2018-06-28*, v. 1, p. 167–174, 2018. Disponível em: <<https://www.ama-science.org/proceedings/details/2811>>.
- 47 OFCA. *Office of Communications Authority of Hong Kong. Statement of the Communications Authority, Change in the Allocation of the 3.4 – 3.7 GHz Band from Fixed Satellite Service to Mobile Service*. 2018. Disponível em: <www.coms-auth.hk/filemanager/statement/en/upload/441/ca_statements20180328_en.pdf>.
- 48 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.676-12 Attenuation by at-mospheric gases and related effects*. 2019. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-I!!PDF-E.pdf>.
- 49 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.2109 Prediction of build-ing entry loss*. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2109-0-201706-I!!PDF-E.pdf>.
- 50 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.452-16 - Prediction procedure for the evaluation of interference between sta-tions on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz*. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452/en>>.
- 51 3GPP. *3rd Generation Partnership Project; 3GPP TR 38.900 Technical Specification Group Radio Access Network; 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>>.
- 52 ITU-R. *International Telecommunication Union - Report ITU-R M.2412-0 - Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020*. 2017. Disponível em: <itu.int/pub/R-REP-M.2412>.
- 53 HAMDY, P. D. M. N. *COMMSCOPE - White Paper - Beamformers explained*. 2020. Disponível em: <<https://www.commscope.com/globalassets/digizuite/542044-Beamformer-Explained-WP-114491-EN.pdf>>.
- 54 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.525-4 - Calculation of free-space attenuation*. 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/en>>.
- 55 ITU-R. *International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R S.465-6 - Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 31 GHz*. 2010. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-S.465/en>>.

56 ITU-R. *International Telecommunication Union. 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>>.

57 ITU-R. *International Telecommunication Union. - Working Party 4A - Task Group 5/1 Doc. 183 - Liaison Statement to Task Group 5/1 FSS/BSS Technical parameters for sharing studies under WRC-19 Agenda item 1.13*. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0183/en>>.

58 ITU-R. *International Telecommunication Union. Working Party 4A - Task Group 5/1 Doc. 411 - Reply to Liaison Statement to task group 5/1 -E*. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0411/en>>.