

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-2020
E TVRO EM BANDA C**

Tarcísio Aurélio Bakaus

Brasília, Setembro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

PÁGINA RESERVADA PARA ASSINATURAS DAS APROVAÇÕES

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

EXAMINADOR INTERNO

EXAMINADOR EXTERNO

DATA

FICHA CATALOGRÁFICA

BAKAUS, TARCÍSIO AURÉLIO

Convivência entre sistemas IMT-2020 e TVRO em Banda C [Distrito Federal] 2022.

xvii, 83p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2022)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. IMT

2. 5G

3. TVRO

4. Conformação de feixe

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BAKAUS, T.A. (2022). Convivência entre sistemas IMT-2020 e TVRO em Banda C. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-791/22, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tarcísio Aurélio Bakaus

TÍTULO: Convivência entre sistemas IMT-2020 e TVRO em Banda C.

GRAU: Mestre – Engenharia Elétrica - Telecomunicações e Redes de Comunicação

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tarcísio Aurélio Bakaus
Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória

*Aos meus pais, por me proverem as condições de viver bem;
Às minhas esposa e filhas por tornarem minha vida mais especial e com mais Amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde, força, coragem e perseverança para chegar até aqui.

Ao meu orientador professor Ugo Dias, por ter aberto as portas que me trouxeram a este caminho de realização e por ter me orientado de maneira leve e tranquila em direção a estes conhecimentos.

Ao meu co-orientador Agostinho Linhares, pela gentileza em aceitar meu convite para me auxiliar nesta tarefa e ter também me orientado e direcionado com uma forma boa, paciente e didática.

Aos meus amigos Calil Queiroz e Edgar Barbosa, pelo grande auxílio prestado, sempre com boa vontade e disponíveis nos momentos necessários, para dividir seus bons conhecimentos técnicos.

Ao meu amigo Marcelo Tapajoz, que também me auxiliou em momentos importantes com seu conhecimento técnico avançado.

Aos meus pais e meu irmão, pelo incentivo e força de sempre.

À minha querida companheira de caminhada, Livia de Carvalho Nastari Bakaus, pelo constante incentivo e carinho em todos os momentos que estamos juntos e, em especial, nesta atividade que vem se concluindo; seguindo seus sábios e amorosos conselhos este árduo trabalho tornou-se mais tranquilo.

Às minhas filhas, Leticia e Ana Gabriela, que tiveram que abdicar de algum tempo com o pai para que este mestrado fosse realizado, e que, com seu especial Amor, coloreem minha vida e encham meu coração de alegria e esperança em um mundo melhor.

Por fim, agradeço a todos os professores e colegas que fizeram parte de forma direta ou indireta na construção deste conhecimento e de minha formação.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de convivência entre sistemas IMT-2020 (sistemas de comunicação móveis de 5ª Geração - 5G) operando na faixa de 3,5 GHz, utilizando antenas com conformação de feixe e setoriais, e estações de recepção doméstica de televisão via satélite (TVRO) na Banda C.

O estudo considera receptores de sistemas de TVRO que operam no Brasil na faixa de 3625-4200 MHz, em quantidade relativamente expressiva, e que poderão ser impactados pela entrada em funcionamento de sistemas 5G operando na faixa adjacente de 3500-3600 MHz.

O trabalho inova em realizar simulações com parâmetros do IMT-2020 utilizando antenas com conformação de feixe (*beamforming*), comparando seu desempenho com as setoriais.

Também inova quando considera as estações de TVRO em posição fixa em relação à estação base do sistema IMT-2020 (50, 100 e 200 metros), conseguindo um valor estatístico melhor do que nos trabalhos nos quais em cada iteração de simulação a TVRO fica em posições aleatórias.

Foram avaliados os números de eventos de interferência, resultando em probabilidade de interferência no tempo, comprovando-se a expectativa de que as antenas com conformação de feixe possuem melhor desempenho do que as setoriais.

Demonstra-se que a maior diretividade das antenas com conformação de feixe utilizadas em sistemas IMT-2020, combinada com a utilização de filtros de TVRO com rejeição de pelo menos 30 dB ou a utilização de receptores modernos de TVRO, com limiares de saturação superiores a -30 dBm, torna a convivência entre os sistemas IMT-2020 e TVRO possível, devido à baixa probabilidade de interferência prejudicial.

Os resultados obtidos neste estudo são importantes para possíveis previsões de mitigação de interferências prejudiciais nos receptores de TVRO em operação no Brasil quando da entrada de sistemas móveis IMT-2020 na faixa de 3,5 GHz, trazendo novas contribuições para decisões técnicas e regulatórias para a futura implementação de redes móveis 5G nesta faixa.

ABSTRACT

This work presents a study of coexistence between IMT-2020 systems (5th Generation mobile systems - 5G) operating in the 3.5 GHz band, using beamforming and sector antennas, and domestic satellite television reception stations (TVRO) in the C Band.

The study considers receivers of TVRO systems that operate in Brazil in the 3625-4200 MHz band, in a relatively expressive amount, and that may be impacted by the entry into operation of 5G systems operating in the adjacent band of 3500-3600 MHz.

The work innovates by running simulations with IMT-2020 parameters using beamforming antennas, comparing their performance with the sectorial ones.

It also innovates when considering the TVRO stations in a fixed position in relation to the base station of the IMT-2020 system (50, 100 and 200 meters), achieving a better statistical value than in the works in which in each simulation iteration the TVRO is in random positions.

The numbers of interference events were evaluated, resulting in interference probability over time, proving the expectation that beamforming antennas have better performance than sectorial ones.

It is proven that the greater directivity of beamforming antennas used in IMT-2020 systems, combined with the use of filters with rejection of at least 30 dB or the use of modern TVRO receivers, with saturation thresholds above -30 dBm, makes coexistence between IMT-2020 and TVRO systems possible, due to the low probability of harmful interference.

The results obtained in this study are important for possible predictions of mitigation of harmful interference in TVRO receivers operating in Brazil when IMT-2020 mobile systems start operating in the 3.5 GHz band, bringing new contributions to technical and regulatory decisions for the future implementation of 5G mobile networks in this range.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	METODOLOGIA.....	3
1.4	CONTRIBUIÇÕES.....	3
1.5	ARTIGO PUBLICADO.....	4
1.6	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	SISTEMAS IMT-2020 - REDES MÓVEIS DE 5ª GERAÇÃO.....	5
2.1.1	CARACTERÍSTICAS DO IMT-2020.....	6
2.1.2	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS PARA O IMT.....	12
2.2	ESTAÇÕES DE RECEPÇÃO DOMÉSTICA DE TELEVISÃO VIA SATÉLITE (TVRO – TV RECEPTION ONLY).....	15
2.2.1	O SERVIÇO FIXO POR SATÉLITE.....	15
2.2.2	A BANDA C.....	17
2.2.3	SISTEMAS DE TVRO.....	18
2.2.4	SISTEMAS DE TVRO NO BRASIL.....	19
2.3	INTERFERÊNCIAS.....	20
2.3.1	EXPLICAÇÃO DO PROBLEMA DE INTERFERÊNCIA DO IMT NA TVRO.....	22
2.3.2	INTERFERÊNCIAS EM SISTEMAS DE TVRO NO BRASIL.....	23
2.3.3	IMPACTOS DO PROBLEMA DE INTERFERÊNCIA NO BRASIL E NECESSIDADE DE ESTUDOS... ..	24
2.4	CONVIVÊNCIA E COMPATIBILIDADE ENTRE SISTEMAS.....	25
3	ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA ANALISADOS.....	29
3.1	ESTUDOS REALIZADOS PELA ANATEL.....	29
3.1.1	RELATÓRIO DOS TESTES DE CONVIVÊNCIA ENTRE O IMT OPERANDO NA FAIXA DE 3,5 GHZ E SISTEMAS SATELITAIS OPERANDO EM FAIXA ADJACENTE (TESTES DE LABORATÓRIO E DE CAMPO – 2018/2019).....	32
3.1.2	ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA ENTRE IMT-2020 E TVRO: SIMULAÇÕES COM SISTEMAS DOMÉSTICOS (MAIO DE 2020).....	38
3.1.3	ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-2020 E SISTEMAS FSS PROFISSIONAIS (MAIO DE 2020).....	40
3.1.4	RELATÓRIO DOS TESTES DE CONVIVÊNCIA ENTRE O IMT OPERANDO NA FAIXA DE 3,5 GHZ E SISTEMAS SATELITAIS OPERANDO EM FAIXA ADJACENTE (OUTUBRO DE 2020).....	41
3.1.5	RELATÓRIO DOS TESTES DE CONVIVÊNCIA ENTRE O IMT-2020 OPERANDO NA FAIXA DE 3,5 GHZ E ESTAÇÕES TERRENAS PROFISSIONAIS OPERANDO EM FAIXA ADJACENTE (DEZEMBRO DE 2020).....	44
3.2	CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-ADVANCED E TVRO NA FAIXA DE 3,5 GHZ (2017).....	46

3.3	RELATÓRIOS DA UIT: ITU-R M.2109 (2007) E ITU-R S.2368-0 (2015) -ESTUDOS DE COMPARTILHAMENTO ENTRE SISTEMAS IMT-ADVANCED E REDES DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS NO FSS NAS FAIXAS DE 3400 – 4200 MHZ E 4500 – 4800 MHZ.....	49
3.4	CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-ADVANCED E SISTEMAS FIXOS POR SATÉLITE NA FAIXA DE 3,5 GHZ NA COLÔMBIA (2020)	51
3.5	ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA, INTERFERÊNCIA E COMPARTILHAMENTO ENTRE IMT-2020 E FSS EM ONDAS MILIMÉTRICAS (2016-2019)	53
3.5.1	CONVIVÊNCIA ENTRE IMT-2020 E FSS NA FAIXA DE 24,25 - 27,5 GHZ	53
3.5.2	CONVIVÊNCIA ENTRE IMT-2020 E FSS NAS FAIXAS DE 37 - 42,5 GHZ E 42,5 - 43,5 GHZ	54
3.5.3	ESTUDO DE INTERFERÊNCIA E COMPARTILHAMENTO DE FREQUÊNCIAS ENTRE IMT-2020 E FSS NAS FAIXAS DE 24,25-27,5 GHZ, 37-42,5 GHZ E 42,5-43,5 GHZ	54
4	MODELAGEM E RESULTADOS	56
4.1	SIMULADOR SHARC	56
4.2	MODELAGEM E METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO	57
4.3	MODELAGEM DO IMT-2020	60
4.3.1	PARÂMETROS DO SISTEMA IMT	60
4.3.2	PARÂMETROS DAS ANTENAS SETORIAIS UTILIZADAS NOS SISTEMAS IMT.....	61
4.3.3	PARÂMETROS DAS ANTENAS COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE UTILIZADAS NOS SISTEMAS IMT.....	65
4.3.4	CÁLCULO DA EIRP	69
4.4	MODELAGEM DA TVRO	70
4.5	MODELO DE PROPAGAÇÃO	71
4.6	CRITÉRIOS ESTABELECIDOS.....	73
4.7	RESULTADOS E ANÁLISE	74
4.7.1	NÍVEL DE REJEIÇÃO DOS FILTROS DE TVRO	76
4.7.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	77
5	CONCLUSÕES.....	79
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	79
5.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	79
	Referências bibliográficas	80

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 - CENÁRIOS DE USO DO IMT-2020 (REC.ITU-R M.2083-0)	7
FIGURA 2. 2 - COMPARAÇÃO DAS CAPACIDADES ENTRE IMT 2020 (5G) E IMT-ADVANCED (4G) (REC.ITU-R M.2083-0).....	9
FIGURA 2. 3 - IMPORTÂNCIA DAS CAPACIDADES ESPECÍFICAS EM FUNÇÃO DOS CENÁRIOS DE USO DO IMT-2020 (REC.ITU-R M.2083-0)	10
FIGURA 2. 4 - REDES VIRTUAIS ESPECÍFICAS PARA OS POSSÍVEIS CENÁRIOS DE UTILIZAÇÃO DO IMT-2020 (REC.ITU-T Y.3112).....	11
FIGURA 2. 5 - EXEMPLOS DE TOPOLOGIAS TÍPICAS DO FSS (REL. ITU-R S.2278).....	16
FIGURA 2. 6 - EXEMPLOS DE TOPOLOGIAS TÍPICAS DO FSS PARA UMA REDE DE EMERGÊNCIA (REL. ITU-R S. 2151).....	16
FIGURA 2. 7 - ESTAÇÕES LICENCIADAS DE FSS NO BRASIL NA FAIXA DE 3,625 – 4,2 GHz (2007).....	18
FIGURA 2. 8 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO LNB.....	19
FIGURA 2. 9 – DIAGRAMA DE INTERFERÊNCIAS ENTRE SISTEMAS IMT-2020 E TVRO EM 3,5 GHz	22
FIGURA 2. 10 – DIAGRAMA DE INTERFERÊNCIAS ENTRE SISTEMAS IMT-2020 E TVRO EM 3,5 GHz, CONSIDERANDO BANDA DE GUARDA.....	23
FIGURA 3. 1 – EXEMPLO DE DIAGRAMA DE TESTE DE LABORATÓRIO	33
FIGURA 3. 2 – FAIXAS EXAMINADAS NOS TESTES DE CAMPO - 2019	34
FIGURA 3. 3 – CONFIGURAÇÕES DOS SÍTIOS IMT E TVRO NOS TESTES DE CAMPO - 2019	35
FIGURA 3. 4 – DISTRIBUIÇÃO DA E.I.R.P. ENTRE TERMINAIS DE USUÁRIOS EM SISTEMAS IMT COM ANTENAS COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE	37
FIGURA 3. 5 – DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO – ANTENAS COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE E SETORIAL	39
FIGURA 3. 6 – FAIXAS EXAMINADAS NOS TESTES DE CAMPO - 2020	42
FIGURA 3. 7 – CONFIGURAÇÕES DOS SÍTIOS IMT E TVRO NOS TESTES DE CAMPO - 2020	43
FIGURA 3. 8 – POSIÇÃO RELATIVA ENTRE O RECEPTOR DE TVRO E A REDE DE 7 CÉLULAS DE LTE SIMULADA NO ESTUDO	47
FIGURA 3. 9 – CENÁRIOS DAS SIMULAÇÕES.....	51
FIGURA 4. 1 - FLUXOGRAMA DE SIMULAÇÃO	58
FIGURA 4. 2 - CLUSTER DE 19 SITES COM 3 SETORES CADA (REC.ITU-R M.2101-0).....	58
FIGURA 4. 3 - POSIÇÕES DA ESTAÇÃO TVRO, BS E UE	59
FIGURA 4. 4 - SISTEMA DE COORDENADAS DE UMA ANTENA SETORIZADA.....	62
FIGURA 4. 5 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DA ANTENA SETORIAL	64
FIGURA 4. 6 - SISTEMA DE COORDENADAS DO PAINEL DE ANTENAS	65
FIGURA 4. 7- DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DE UM ELEMENTO DE ANTENA.....	66
FIGURA 4. 8 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DA ANTENA COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE	67
FIGURA 4. 9 - DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DAS ANTENAS SETORIAL E COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE SOBREPOSTOS.....	68
FIGURA 4. 10 - DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DA ANTENA SETORIAL E COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE VARIANDO O FEIXE ..	68
FIGURA 4. 11 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 48º A 50M/OESTE DA BS	74
FIGURA 4. 12 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 48º A 100M/OESTE DA BS	74
FIGURA 4. 13 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 48º A 200M/OESTE DA BS	75
FIGURA 4. 14 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 80º A 50M/OESTE DA BS	75
FIGURA 4. 15 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 80º A 100M/OESTE DA BS	76
FIGURA 4. 16 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 80º A 200M/OESTE DA BS	76
FIGURA 4. 17 - TVRO COM ELEVAÇÃO DE 48º A 100M/OESTE E A 60º DO EIXO DA BS.....	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 - CENÁRIOS DE REDES MÓVEIS DE ACESSO (REC.ITU-R M.2101-0).....	27
TABELA 4. 1 - PARÂMETROS DA ESTAÇÃO BASE (BS).....	60
TABELA 4. 2 - PARÂMETROS DOS TERMINAIS DE USUÁRIOS (UE).....	61
TABELA 4. 3 - PARÂMETROS DAS ANTENAS SETORIAIS.....	64
TABELA 4. 4 - PARÂMETROS DAS ANTENAS COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE.....	69
TABELA 4. 5 – PARÂMETROS DA ESTAÇÃO DE TVRO	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

$A_{A,Feixe i}$	Ganho do i -ésimo feixe
A_E	Ganho de um elemento de antena
$A_{E,H}$	Ganho horizontal de um elemento de antena
$A_{E,V}$	Ganho vertical de um elemento de antena
A_h	Perda adicional por obstruções (clutter loss)
A_m	Relação frente-costa horizontal de um elemento de antena
C	Fator de atenuação de inclinação
d	<i>Distância</i>
d_H	Espaçamento horizontal entre elementos de antena
dk	Distância do ponto de obstrução à antena do receptor
d_V	Espaçamento vertical entre elementos de antena
f	Frequência
G_a	Ganho do arranjo
G_E	Ganho do elemento da antena
$G_{E,max}$	Ganho máximo de um elemento de antena
G_θ	Ganho máximo no plano de azimute da antena (horizontal)
$G_{hr}(x_h)$	Ganho relativo da antena no plano de azimute na direção normalizada $(x_h,0)$
$G_{vr}(x_v)$	Ganho relativo da antena no plano de elevação na direção normalizada $(0,x_v)$
h	Altura da antena do receptor
h_a	Altura do ponto de obstrução
k_h	Fator de ajuste do padrão de azimute com base na energia perdida
k_p	Parâmetro de ganho mínimo relativo para o pico do lóbulo lateral
k_v	Fator de ajuste do padrão de elevação com base na energia perdida
L_Ω	Perda ôhmica
N_{el}	Número de elementos de antena do painel
N_H	Número de colunas da matriz de antenas
N_V	Número de linhas da matriz de antenas
O_{th}	Limite de saturação (threshold)
P_{pel}	Perda de propagação no espaço livre (free space path loss)
P_{prop}	Perda de propagação
P_{Tx}	Potência de transmissão
R	Taxa de compressão de ganho horizontal conforme o ângulo de azimute é deslocado
SLA_v	Atenuação vertical dos lóbulos laterais do elemento de antena
$v_{n,m}$	Elemento do vetor de superposição
$w_{i,n,m}$	Elemento do vetor de pesos para o i -ésimo feixe
X_σ	Variável aleatória gaussiana que modela o desvanecimento lento

Símbolos gregos

θ	Ângulo de direção de elevação (vertical)
θ_{3db}	Largura de feixe de 3 dB no plano de elevação
$\theta_{i,feixe}$	Direção (elevação) de apontamento do i-ésimo feixe
λ	Comprimento de onda
φ	Ângulo de direção de azimute (horizontal)
φ_{3db}	Largura de feixe de 3 dB no plano de azimute
$\varphi_{i,feixe}$	Direção (azimute) de apontamento do i-ésimo feixe

Notação matemática

$\cos(\cdot)$	Função cosseno
$exp(\cdot)$	Função exponencial
$log(\cdot)$	Função logarítmo
$log_{10}(\cdot)$	Função logarítmo na base 10
$min(\cdot)$	Função mínimo
$sen(\cdot)$	Função seno
$tan(\cdot)$	Função tangente

Unidades

o	Grau
%	Porcento
dB	Decibel
dBi	Decibel relativo à antena isotrópica
dBm	Decibel miliwatt
Gbps	Gigabits por segundo
GHz	Gigahetz
Hz	Hertz
K	Kelvin
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
km/h	Quilômetros por hora
m	Metro
m ²	Metro quadrado
ms	Milisseundos
Mbps	Megabit por segundo
MHz	Megahetz
ms	Milisegundo

Siglas e abreviações em português

3G	Terceira geração de comunicações móveis
4G	Quarta geração de comunicações móveis
5G	Quinta geração de comunicações móveis
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
CEO	Comitê de Uso do Espectro e de Órbita da Anatel
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
CRT	Centro de Referência Tecnológica da Claro
MCOM	Ministério das Comunicações
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
SBrT	Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais
SGDC	Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas
TCU	Tribunal de Contas da União
TV	Televisão
UFRJ	Universidade do Rio de Janeiro
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UIT-R	Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações
UnB	Universidade de Brasília

Siglas e abreviações em línguas estrangeiras

3GPP	<i>3G Partnership Project</i> - Projeto de parceira de terceira geração
ACLR	<i>adjacent channel leakage ratio</i> - taxa de vazamento do canal adjacente
BS	<i>Base Station</i> – Estação Base
eirp	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i> - potência isotrópica radiada efetiva (ou equivalente)
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i> - Banda larga aumentada (ou melhorada)
FSPL	<i>Free-space path loss</i>
FSS	<i>Fixed Satellite Service</i> - Serviço Fixo por Satélite
IMT	<i>International Telecommunications Mobile</i> - Telecomunicações Móveis Internacionais
IMT-Advanced	Telecomunicações Móveis Internacionais - Avançado
IoT	<i>Internet of Things</i> – Internet das Coisas
ISS	<i>Inter-satellite Service</i> – Serviço Entre Satélites
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> - União Internacional de Telecomunicações
LNA	<i>low noise amplifier</i> - amplificador de baixo ruído
LNB	<i>low noise block downconverter</i> - conversor descendente de bloco de baixo ruído
LNBF	<i>low noise block downconverter feedhorn</i> - conversor descendente de bloco de baixo ruído com alimentador acoplado
LTE	<i>Long Term Evolution</i> – Evolução de longo termo
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> - Múltiplas entradas e múltiplas saídas
mMTC	<i>Massive machine type communications</i> - Comunicação massiva máquina-máquina
OOBE	<i>Out-of-band emission</i> – emissões fora de faixa

PSK	<i>Phase-shift keying</i> – Modulação por deslocamento de fase
RR	<i>Radio Regulations</i> – Regulamento de Radio
SMA	<i>Suburban Macrocell</i> – Macro célula suburbana
SHARC	<i>SHARing and Compatibility</i> – Compartilhamento e compatibilidade
TDD	<i>Time Division Duplex</i> - Duplexação por divisão no tempo
TG 5/1	<i>Task Group 5/1</i> – Grupo de tarefas 5/1
TVRO	<i>Television Reception Only</i> - Recepção doméstica de televisão via satélite
UE	<i>User Equipment</i> – Equipamento (ou terminal) de Usuário
UMa	<i>Urban Macrocell</i> – Macro célula urbana
URLLC	<i>Ultra-reliable and low latency communications</i> - Comunicação de ultra confiabilidade e baixa latência
USm	<i>Urban Small Cell</i> – pequena célula urbana
VSAT	<i>Very Small Aperture Terminal</i> - Terminal de abertura muito pequena
WARC	<i>World Administrative Radio Conference</i> – Conferência Mundial Administrativa de Radio
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> – Organização Meteorológica Mundial
WP 5D	<i>Working Party 5D</i> – Grupo de Trabalho 5D
WRC	<i>World Radiocommunication Conference</i> - Conferência Mundial de Radiocomunicações (CMR)

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda por taxas de dados por comunicações móveis vem crescendo de maneira exponencial nos últimos anos e projeções demonstram um tráfego mensal global de 77,5 exabytes em 2022, mais de seis vezes superior ao tráfego do ano de 2017 [1], e de 4.394 exabytes em 2030 [2].

Os sistemas móveis de 5ª Geração (5G), denominados IMT-2020 pela União Internacional de Telecomunicações (UIT), estão ainda em seu início comercial, porém já se desenvolvem em diversos países e prometem altas taxas de dados aliadas à baixa latência e ultra confiabilidade, conforme as características necessárias a cada tipo de aplicação [3], o que corrobora o aumento da demanda de taxas de dados em nível mundial.

Conforme decisão da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 (WRC-19), os sistemas IMT-2020 utilizarão as faixas de 26 GHz, 40 GHz e 70 GHz [4], sendo que já podem operar nas faixas atribuídas para os sistemas móveis atuais, como por exemplo 700 MHz, 900 MHz, 2,3 GHz e 3,5 GHz, conforme as regulamentações de cada país.

No Brasil, em fevereiro de 2020, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) publicou a Portaria nº 418, que estabelece diretrizes para os certames licitatórios das faixas de radiofrequências de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz para banda larga móvel [5], contendo adicionalmente critérios para a proteção dos usuários que recebem sinais de TV aberta e gratuita por meio de antenas parabólicas na Banda C satelital, adjacente à faixa de 3,5 GHz.

Na sequência, a Anatel publicou a Consulta Pública nº 9, contendo “Edital de Licitação para a disponibilização de espectro de radiofrequências para a prestação de serviços de telecomunicações, inclusive por meio de redes ditas de quinta geração (5G), em áreas de abrangência regionais ou nacional”, iniciada em 17/02/2020 e finalizada em 17/04/2020 [6].

Em janeiro de 2021, o Ministério das Comunicações (MCOM) publicou a Portaria nº 1.924/SEI-MCOM [7], que revogou a portaria de 2020 do MCTIC, mantendo os critérios anteriores, com poucas alterações, para a proteção dos usuários que recebem sinais de TV aberta e gratuita por meio de antenas parabólicas na Banda C satelital, adjacente à faixa de 3,5 GHz.

Em 25 de fevereiro de 2021, em sua 896ª reunião, o Conselho Diretor da Anatel aprovou o Edital de Licitação das faixas de radiofrequências de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e

26 GHz [8], que foi encaminhado para o Tribunal de Contas da União (TCU) em março de 2021 [9] para avaliação e considerações, conforme trâmites burocráticos necessários para a realização do processo de licitação.

Em 27 de setembro de 2021 foi publicado o Edital nº 1/2021 [10], que tratou da Licitação nº 1/2021-SOR/SPR/CD-Anatel, de radiofrequências nas faixas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz, o leilão do 5G, que foi a maior oferta de espectro da história da Anatel [11].

A licitação, que ocorreu nos dias 4 e 5 de novembro de 2021, arrecadou R\$ 47,2 bilhões e foi homologada em 23 de novembro [12] por meio do Acórdão nº 381/2021 [13]. Dentre as faixas licitadas está a de 3,5 GHz (3300-3700 MHz), que representa 100 MHz adicionais à faixa atualmente destinada para o Serviço Móvel Pessoal (3300 – 3600 MHz).

No Brasil, na faixa adjacente superior de 3625-4200 MHz operam estações do serviço fixo por satélite, majoritariamente com a aplicação de recepção doméstica de televisão via satélite (TVRO, do inglês *TV Reception Only*), que, embora não sejam licenciadas ou cadastradas pela Anatel sob um determinado serviço de telecomunicações, são estimadas em aproximadamente 20 milhões de usuários [14].

Não obstante não possuírem direito à proteção contra interferências prejudiciais, existem possíveis consequências sociais caso estes sistemas não sejam protegidos contra interferências prejudiciais provenientes de outros sistemas de radiocomunicações, como o IMT-2020, sendo por este motivo que a Portaria nº 1.924/SEI-MCOM [7] estabeleceu as políticas públicas orientando a Anatel a estabelecer medidas de forma a assegurar a recepção do sinal de televisão aberta e gratuita pela população afetada.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo de convivência entre os sistemas IMT-2020 em 3,5 GHz e as estações de TVRO operando na faixa adjacente de 3625-4200 MHz de forma a manter os níveis de recepção com qualidade para a recepção doméstica de televisão via satélite.

De forma específica, pretende-se avaliar, comparativamente, o uso de antenas com conformação de feixe (*beamforming*) e do tipo setorial em sistemas IMT-2020 na faixa de 3,5 GHz, considerando a probabilidade do nível de interferência causado por estes sistemas nas

estações de TVRO na faixa adjacente, com enfoque na implementação dos futuros sistemas 5G no Brasil.

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, são realizados estudos de convivência entre os sistemas utilizando a ferramenta colaborativa de código de fonte aberta denominada SHARC [15], desenvolvida pela Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão da Agência Nacional de Telecomunicações do Brasil (Anatel) em colaboração com a Universidade de Brasília (UnB).

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho contribui de forma significativa com novos resultados para os estudos de convivência atualmente realizados no Brasil entre os sistemas IMT-2020 (5G) na faixa de 3,5 GHz e os sistemas de TVRO na faixa adjacente de 3625-4200 MHz.

Por meio da análise de interferência causada em sistemas de TVRO, este estudo demonstra o melhor desempenho de antenas com conformação de feixe (*beamforming*) quando comparada às setoriais atualmente utilizadas. Sendo assim, os resultados aqui apresentados contribuem para um melhor entendimento da compatibilidade eletromagnética entre sistemas IMT-2020 e receptores TVRO.

Este trabalho inova em realizar simulações com parâmetros do IMT-2020 utilizando antenas com conformação de feixe (*beamforming*), comparando seu desempenho com as setoriais.

Também inova quando considera as estações de TVRO em posição fixa da estação base do sistema IMT-2020 (50, 100 e 200 m a oeste), conseguindo um valor estatístico melhor do que nos trabalhos nos quais em cada iteração de simulação a TVRO fica em posições aleatórias, trazendo resultados expressos em probabilidade de interferência no tempo em cada posição da estação de recepção de TVRO. Ou seja, as estações de TVRO foram colocadas em posição fixa e foram avaliados os números de eventos de interferência, resultando, como explicado, em probabilidade de interferência no tempo.

Adicionalmente, traz novos insumos para as decisões técnicas e regulatórias para a implementação futura das redes móveis de 5G na faixa de 3,5 GHz.

Por fim, traz ainda uma apresentação e utilização da ferramenta colaborativa SHARC, desenvolvida pela Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão da Agência Nacional de Telecomunicações do Brasil (Anatel) em colaboração com a Universidade de Brasília (UnB).

1.5 ARTIGO PUBLICADO

Sobre o tema apresentado nesta dissertação, foi publicado o artigo “Convivência entre Sistemas IMT-2020 e TVRO em Banda C” no XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2020), realizado pela Sociedade Brasileira de Telecomunicações. O simpósio ocorreu entre os dias 22 a 25 de novembro de 2020 de forma virtual [16].

1.6 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO

O restante desta dissertação está dividido conforme segue.

O Capítulo 2 apresenta conceitos básicos a respeito dos Sistemas IMT-2020 (Redes Móveis de 5ª Geração) e suas principais características, o Serviço Fixo por Satélite (FSS) e seu uso na Banda C por meio das estações de TVRO, com foco na utilização no Brasil, e conceitos relativos a interferências, convivência e compatibilidade entre sistemas.

No Capítulo 3 são apresentados estudos de convivência entre sistemas IMT e de TVRO na faixa de 3,5 GHz, com enfoque especial em estudos realizados pela Anatel nos anos de 2019 e 2020, e em um estudo relativo à convivência entre IMT-*Advanced* (Redes móveis de 4ª Geração) e TVRO no Brasil. Além disso, apresenta alguns outros estudos utilizados como referência para a dissertação e relevantes para o futuro do 5G no país e no mundo.

No Capítulo 4 é apresentado o simulador SHARC, a modelagem e metodologia utilizadas na simulação, os parâmetros considerados para os sistemas IMT-2020, para as antenas e para os sistemas de TVRO, o modelo de propagação, os critérios estabelecidos, os resultados e sua análise e interpretação.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões, com as considerações gerais e apresentadas possibilidades de futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados fundamentos e conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho.

Inicialmente são apresentados os Sistemas IMT-2020 (chamados também de Redes Móveis de 5ª Geração – 5G), suas principais características e as faixas de frequências consideradas para sua operação, o Serviço Fixo por Satélite (FSS), sua utilização na Banda C, e sistemas de TVRO em operação no Brasil.

Na sequência é explicado o problema das interferências, especificamente provenientes de sistemas IMT-2020 em sistemas de TVRO na Banda C, e os possíveis impactos destes problemas nos sistemas de TVRO no Brasil.

A seguir menciona-se o tema de convivência e compatibilidade entre sistemas, e, por fim, considerações sobre estudos de convivência.

2.1 SISTEMAS IMT-2020 - REDES MÓVEIS DE 5ª GERAÇÃO

O IMT (*International Mobile Telecommunications*) é o nome dado pela União Internacional de Telecomunicações (UIT) para os sistemas móveis de banda larga, englobando os seguintes sistemas:

- a) Redes móveis de 3ª Geração (3G), denominados pela UIT de IMT-2000 e especificados na Recomendação ITU-R M.1457-15 [17];
- b) Redes móveis de 4ª Geração (4G), denominados pela UIT de IMT-*Advanced* e especificados na Recomendação ITU-R M.2012-4 [18]; e
- c) Redes móveis de 5ª Geração (5G), denominados pela UIT de IMT-2020 e especificados na Recomendação ITU-R M.2083-0 [3].

A UIT tem trabalhado há mais de duas décadas em estudos de IMT, tendo produzido relatórios importantes sobre tráfego, tendências tecnológicas e viabilidade destes sistemas, e dentre eles podem ser citados os seguintes:

- a) Relatório ITU-R M.2320-0 - Tendências tecnológicas futuras dos sistemas IMT terrestres, que inclui informações técnicas e operacionais dos sistemas, desenvolvimento de técnicas de eficiência espectral, e outras evoluções [19];

- b) Relatório ITU-R M.2370-0 – Estimativa de tráfego IMT para os anos 2020 a 2030, que contém uma estimativa que considera diversos tipos de tráfego e a evolução da utilização da tecnologia móvel [2];
- c) Relatório ITU-R M.2376-0 - Viabilidade técnica do IMT nas faixas acima de 6 GHz, que inclui informações sobre potenciais novas tecnologias de rádio IMT e abordagens de sistema, que podem ser apropriadas para operação na faixa de 6 GHz a 100 GHz [20];
- d) Relatório ITU-R M.2290-0 – Estimativa de requisitos de espectro futuro para o IMT terrestre, que fornece os resultados de estudos sobre as necessidades estimadas de espectro global para IMT terrestre no ano de 2020 [21];
- e) Relatório ITU-R M.2243-0 - Avaliação das implantações de banda larga móvel global e previsões para telecomunicações móveis internacionais, que inclui tendências para o incremento da demanda de uso da banda larga móvel [22].

Considerando que a abordagem da simulação deste estudo concentra-se em sistemas IMT-2020, a seguir são tratadas algumas características específicas destas que são comumente chamadas de redes móveis de 5ª Geração.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS DO IMT-2020

O IMT-2020 promete revolucionar o setor de telecomunicações, pois, diferentemente das tecnologias anteriores, focadas na conexão entre os usuários e na promoção de uma melhor qualidade de transmissão de dados, esta nova geração promete maior velocidade de conexão e níveis mínimos de latência, e deverá reduzir a lacuna de qualidade de conexão entre pessoas com acesso à tecnologias de ponta e as que não têm, como ocorre entre usuários de áreas urbanas e rurais.

Deverá acabar com problemas de conexão em grandes eventos, quando há um grande número de pessoas demandando simultaneamente a rede, e se propõe a tornar realidade a conexão permanente e simultânea entre milhares de dispositivos (Internet das Coisas –IoT, do inglês *Internet of Things*), o que, ao se concretizar, será um ponto de inflexão da indústria de telecomunicações.

Uma série de melhorias na vida cotidiana e novos modelos de negócios emergirão, promovendo desde facilidades na vida doméstica até grandes avanços de mobilidade urbana.

Os cenários de uso foram classificados em três verticais pela UIT, sendo que as aplicações podem ter características de uma ou mais dessas verticais:

- a) Banda larga aprimorada (eMBB, do inglês *Enhanced Mobile Broadband*), para acessos a conteúdos de mídia, serviços e dados, com novas áreas de aplicações com necessidades de capacidades de tráfego altíssimas, porém com menos necessidade de mobilidade, e com o aprimoramento da experiência do usuário;
- b) Comunicação de ultra confiabilidade e baixa latência (URLLC, do inglês *Ultra-reliable and low latency communications*), com aplicações que possuam requisitos rigorosos de taxa de transferência (*throughput*), latência e disponibilidade, como por exemplo processos de fabricação ou produção industrial controlados sem fio, cirurgia médica remota, automação, segurança de transporte, etc;
- c) Comunicação massiva máquina-máquina (mMTC, do inglês *Massive machine type communications*), com aplicações que possuem um número expressivo de dispositivos conectados transmitindo a uma taxa de dados relativa baixa e que não são sensíveis a atrasos.

A Recomendação ITU-R M.2083-0 (IMT *Vision*), que traz mais informações a respeito desta tecnologia que se propõe a revolucionar o mundo, exemplificou os cenários de uso do IMT-2020 conforme demonstra-se na Figura 2.1.

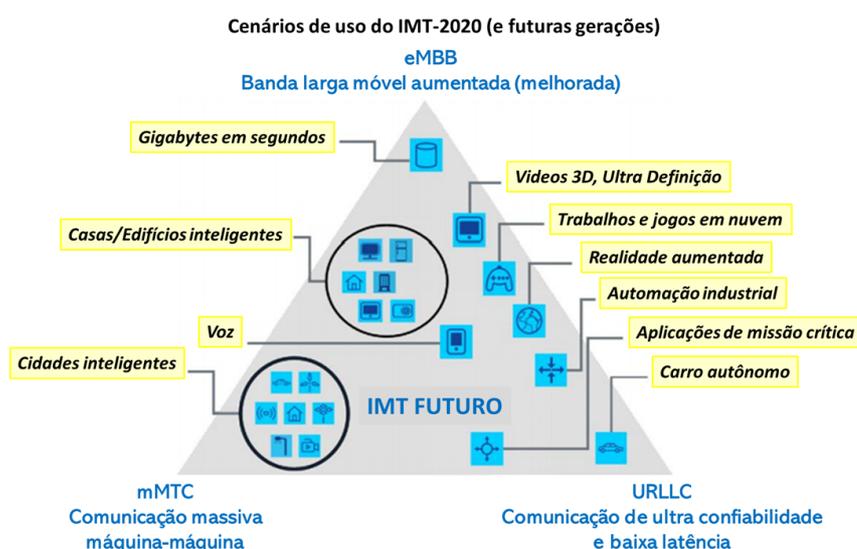


Figura 2. 1 - Cenários de uso do IMT-2020 (Rec.ITU-R M.2083-0)

Na mesma recomendação são comparadas as tecnologias IMT-2020 e IMT-Advanced, demonstrando a extrema evolução de capacidade do 5G, que possui um aumento expressivo em todas as características principais elencadas pela UIT, em relação ao 4G, considerando principalmente as características apresentadas no Relatório ITU-R M.2134-0 [23], a saber:

- a) Taxa de pico de dados 20 vezes maior, chegando a 20 Gbps em certas condições específicas (*Peak data rate*);
- a) Taxa de dados experimentada pelo usuário 10 vezes maior, chegando em 100 Mbps em áreas urbanas e suburbanas e até 1 Gbps em casos de utilização interna (*indoor*) (*User experienced data rate*);
- b) Eficiência de espectro 3 vezes maior para banda larga móvel aumentada, com expectativa de chegar a 5 vezes maior em cenários específicos (*Spectrum efficiency*);
- c) Mobilidade aproximadamente 42% maior, podendo chegar a 500 km/h com uma qualidade de serviço adequada, o que atenderá os trens de alta velocidade (*Mobility*);
- d) Tempo de latência 10 vezes menor, chegando a 1 ms (*Latency*);
- e) Densidade de conexões 10 vezes maior, podendo conectar 1 milhão de equipamentos/km², por exemplo para cenários de internet das coisas e comunicação máquina-máquina (*Connection density*);
- f) Eficiência de energia na rede 100 vezes maior (*Network energy efficiency*);
- g) Capacidade de tráfego 100 vezes maior, chegando a 10 Mbps em pontos de acesso (*hotspots*) (*Area traffic capacity*).

A Figura 2.2 apresenta a comparação entre o IMT-2020 (5G) e o IMT-Advanced (4G).

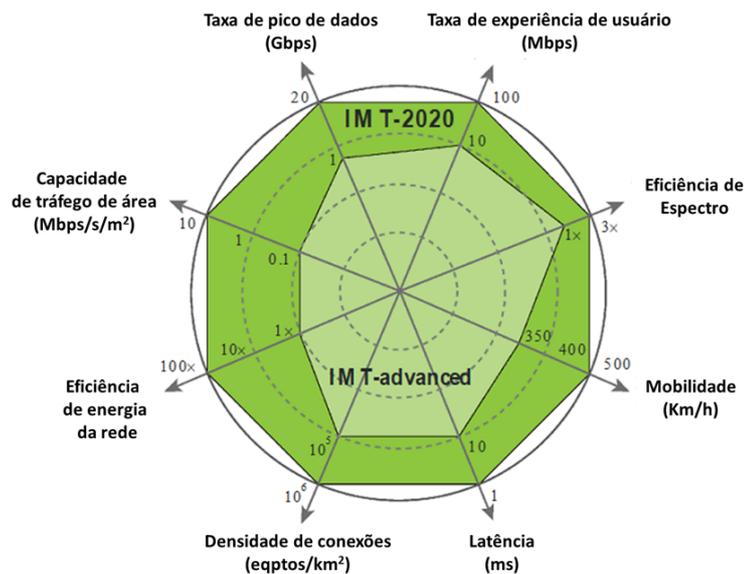


Figura 2. 2 - Comparação das capacidades entre IMT 2020 (5G) e IMT-Advanced (4G) (Rec.ITU-R M.2083-0)

Novamente, em função do cenário de uso apresentado na Figura 2.1, a relevância de certas capacidades específicas pode ser significativamente diferente.

Para um cenário de banda larga móvel aumentada, as características relativas à taxa de dados experimentada pelo usuário, capacidade de tráfego de área, taxa de pico de dados, mobilidade, eficiência energética e eficiência do espectro possuem maior importância que aquelas relacionadas à latência e densidade de conexões. Para este caso pode ser citado um local com diversos pontos de acesso, por exemplo uma livraria e cafeteria, nos quais se torna mais necessária uma alta taxa de dados de experiência do usuário com uma mobilidade reduzida, do que no caso de uso com cobertura de uma área mais ampla.

Em cenários específicos para aplicações críticas de segurança pública, segurança de transportes e casos de alta mobilidade, por exemplo, características relacionadas às comunicações de ultra confiabilidade e baixa latência podem ser de maior importância do que altas taxas de dados. A segurança de cidades e de autoridades mundiais, por exemplo, se enquadra neste cenário.

Por outro lado, em cenários de comunicação massiva máquina-máquina, a alta densidade de conexão é extremamente necessária para suportar um grande número de dispositivos na rede que, por exemplo, pode transmitir apenas ocasionalmente, com baixa taxa de dados e mobilidade muito baixa ou nenhuma. Neste cenário algumas aplicações das

chamadas cidades inteligentes (*smart cities*), como o governo digital (*e-government*) e a saúde digital (*e-health*), se encaixam perfeitamente.

A Figura 2.3 traduz graficamente a importância das características principais em função dos cenários de uso possíveis do IMT-2020.

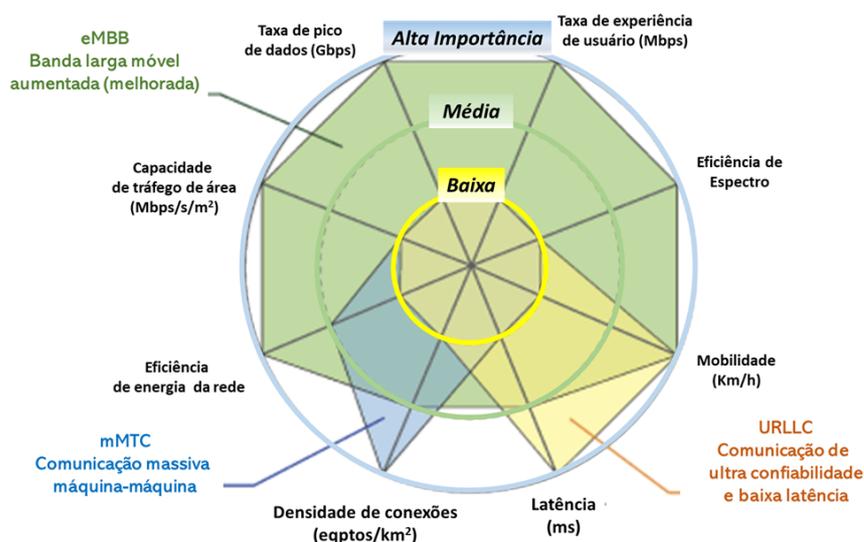


Figura 2. 3 - Importância das capacidades específicas em função dos cenários de uso do IMT-2020 (Rec.ITU-R M.2083-0)

O IMT-2020 necessitará de um maior aprimoramento em diversas características com o objetivo de torná-lo mais seguro, confiável e flexível para estes e outros possíveis cenários, como por exemplo flexibilidade de espectro e de largura de faixa, altíssimo nível de confiabilidade e disponibilidade, resiliência a distúrbios diversos, privacidade, e tempo útil de operação (durabilidade das baterias).

As inovações tecnológicas, fruto dos estudos acadêmicos e da indústria de tecnologia móvel, a correta regulamentação mundial, por meio dos órgãos internacionais como a UIT e o 3GPP, e o envolvimento dos diversos atores que atuam neste cenário de disrupção mundial, se encarregarão de desenvolver as novas funcionalidades e implementar o que for necessário para garantir o futuro das redes móveis 5G.

Fatiamento de Rede (*Network Slicing*)

A alta capacidade projetada para o IMT-2020, aliada à sua possibilidade de utilização nos diversos cenários apresentados, possibilitará atender a múltiplos e diferentes requisitos ao mesmo tempo, permitindo que estes sistemas sejam explorados por diversos segmentos da indústria, como automotivo, manufatura, logística, energia, e setores como financeiro, saúde e outros que ainda não estão explorando totalmente o potencial de serviços móveis, devido à diversidade de requisitos de comunicação de cada negócio [24].

Se atualmente a solução para atendimento a estes diferentes cenários e requisitos é construir conjuntos de redes dedicadas específicas para cada necessidade, uma abordagem muito mais eficiente é operar várias redes dedicadas em uma plataforma comum, utilizando-se de técnicas modernas de fatiamento de rede, com a execução de múltiplas redes lógicas como negócios virtualmente independentes operando em uma mesma infraestrutura física comum de maneira eficiente e econômica.

O fatiamento de rede permite que o operador da rede móvel possa prover redes customizadas com diferentes tipos de funcionalidades e níveis de prioridade, controle e segurança, aliados a diversos níveis de desempenhos de latência, mobilidade, disponibilidade e taxas de dados, ou ainda atender a distintos tipos de usuários como redes corporativas, redes de segurança pública, e outros [25].

Esta é uma mudança radical de paradigma em comparação com as implementações atuais, pois a técnica de fatiamento de redes permite que a rede móvel se adapte ao ambiente externo e às suas necessidades, criando facilidades aos cenários necessários e permitindo o atendimento a cada ambiente de uso, ou seja, para cada fatia de rede certos recursos específicos serão dedicados sob demanda [26], conforme a Figura 2.4 [27].

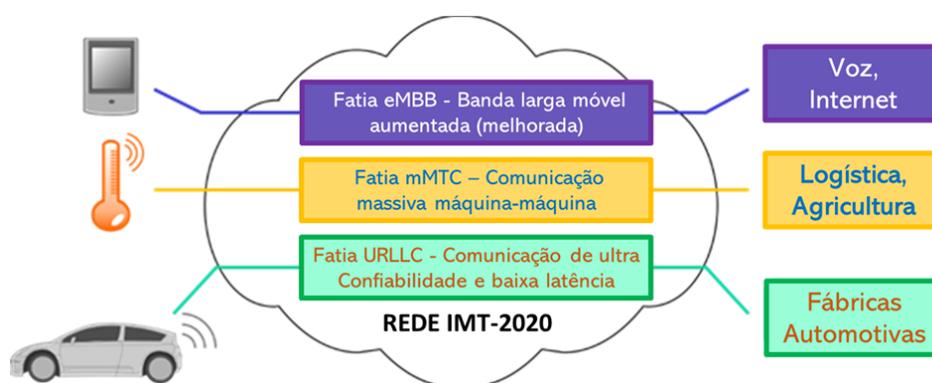


Figura 2. 4 - Redes virtuais específicas para os possíveis cenários de utilização do IMT-2020 (Rec.ITU-T Y.3112)

2.1.2 FAIXAS DE FREQUÊNCIAS PARA O IMT

Os Regulamentos de Radio da UIT (RR, do inglês *Radio Regulations*) [28], tratado internacional de utilização do espectro de radiofrequências e das órbitas de satélites geoestacionários e não-geoestacionários, definem as atribuições das faixas de radiofrequências aos diversos serviços de radiocomunicações, em nível regional e mundial, além de recomendações, resoluções, provisões regulatórias, definições e outras informações relevantes aos países e usuários dos serviços de radiocomunicações.

Sua revisão é realizada em média de quatro em quatro anos, por meio das conferências mundiais de radiocomunicações (WRC, do inglês *World Radiocommunication Conference*) [29], que decidem, após estudos de itens específicos, determinados pela agenda de cada conferência anterior, e convergência de posicionamentos dos Estados Membros da UIT, as atualizações necessárias para garantir o desenvolvimentos das telecomunicações em âmbito mundial.

O Setor de Radiocomunicações da UIT (ITU-R) está envolvido diretamente nos estudos para a padronização e identificação do espectro de sistemas de comunicação móvel pessoal para as Telecomunicações Móveis Internacionais (IMT) no RR.

As primeiras identificações de espectro de radiofrequências para IMT ocorreram nas faixas de 2000 MHz e 2200 MHz, na Conferência Mundial Administrativa de Rádio de 1992 (WARC-92, do inglês *World Administrative Radio Conference - 1992*) [30].

A seguir, nas Conferências Mundiais de Radiocomunicações (WRC), foram identificadas para IMT as seguintes faixas:

- a) 1900 MHz, na WRC-1998;
- b) 800 MHz, 900 MHz, 1700 MHz, 1800 MHz, 2500 MHz e 2600 MHz, na WRC-2000;
- c) 450 a 470 MHz e 700 MHz, 2300 MHz, 3400 a 3600 MHz (na Banda C, em muitos países da Região 1 e alguns países da Região 3), na WRC-07;
- d) 500 MHz nas Regiões 2 e 3, 600 MHz na Região 3, 1427 a 1518 MHz (Banda L), 3300 a 3400 MHz, 3400 a 3600 na Região 2, 3600 a 3700 MHz em alguns países na Região 2, 4800 a 4990 MHz no Uruguai e em 3 países da Região 3, na WRC-15;
- e) 600 MHz na Região 2, 4800 a 4990 MHz amplia a identificação no Brasil e Paraguai na Região 2, e em diversos Países da Região 3, na WRC-19.

Na Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019 (WRC-19) se iniciaram as primeiras identificações de faixas em ondas milimétricas para o IMT-2020, sendo identificadas as novas faixas de 24,25 – 27,5 GHz, 37 – 43,5 GHz, e 66 – 71 GHz, em nível mundial, e as faixas de 45,5 – 47 GHz e 47,2 – 48,2 GHz para determinados grupos de países ou regiões. Estas altas faixas de radiofrequências em gigahertz tornarão possível a utilização de novas aplicações de banda larga aumentada, baixa latência, ultra confiabilidade e utilização massiva de equipamentos, realizando as expectativas esperadas para as redes móveis de 5ª Geração.

A Recomendação ITU-R M.1036-6 [31] traz os arranjos das faixas identificadas para o IMT: 450-470 MHz, 470-960 MHz, 1427-1518 MHz, 1710-2200 MHz, 2300-2400 MHz, 2500-2690MHz, 3300-3700 MHz, 4800-4990 MHz. Ressalta-se que esta recomendação atualmente encontra-se em revisão, com o objetivo de abarcar as novas faixas identificadas pela WRC-19.

Para a WRC-23 estão em estudos novas provisões técnicas e regulatórias, regionais ou mundiais, para utilização das faixas 3300-3400 MHz, 3600-3800 MHz, 6425-7025 MHz, 7025-7125 MHz, e 10-10,5 GHz, conforme a Resolução 811 (WRC-19) [32].

No Brasil, considerando as faixas já licenciadas para o serviço móvel e identificadas no país para utilização de IMT, existe a possibilidades de utilização de IMT-2020 nas faixas de 450-470 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 2300-2390 MHz, 3300-3700 MHz e 24,25-27,5 GHz.

Faixa de 3,5 GHz para IMT no Brasil

Especificamente a respeito da faixa de 3,5 GHz, objeto deste trabalho, o governo brasileiro, por meio de uma série de instrumentos legais recentes, realizou ações concretas com o objetivo de ampliar as redes móveis do país para serviços de 5ª Geração nesta faixa, conforme segue:

- a) Resolução nº 711, de 28 de maio de 2019, da Anatel, que “destina faixas de radiofrequências e aprova o Regulamento sobre Condições de Uso da Faixa de Radiofrequências de 3,5 GHz” [33], revogando a Resolução nº 537, de 17 de fevereiro de 2010, que já atribuía a faixa de 3400 a 3600 MHz para o serviço móvel pessoal, porém, pelos problemas técnicos relativos à convivência com o FSS, não havia sido ainda disponibilizada para uso das redes móveis no país;

- b) Portaria nº 418, de 31 de janeiro de 2020, do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, que “estabelece diretrizes para os certames licitatórios das faixas de radiofrequências de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz e define critérios para a proteção dos usuários que recebem sinais de TV aberta e gratuita por meio de antenas parabólicas na Banda C satelital, adjacente à faixa de 3,5 GHz” [5];
- c) Consulta Pública nº 9 da Anatel, contendo “Edital de Licitação para a disponibilização de espectro de radiofrequências para a prestação de serviços de telecomunicações, inclusive por meio de redes ditas de quinta geração (5G), em áreas de abrangência regionais ou nacional”, iniciada em 17/02/2020 e finalizada em 17/04/2020 [6];
- d) Portaria nº 1.924/SEI-MCOM, de 29 de janeiro de 2021, do Ministério das Comunicações, que “estabelece diretrizes para os certames licitatórios das faixas de radiofrequências de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz e define critérios para a proteção dos usuários que recebem sinais de TV aberta e gratuita por meio de antenas parabólicas na Banda C satelital, adjacente à faixa de 3,5 GHz” [7];
- e) Aprovação pelo Conselho Diretor da Anatel, em sua 896ª reunião, de 25 de fevereiro de 2021, do Edital de Licitação das faixas de radiofrequências de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz [8];
- f) Edital nº 1/2021 da Anatel [10], de 27 de setembro de 2021, que tratou da licitação de radiofrequências nas faixas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz (leilão do 5G);
- g) Acórdão nº 381/2021 [34], de 23 de novembro de 2021, com a homologação da licitação ocorrida nos dias 4 e 5 de novembro de 2021 (leilão do 5G).

Nosso estudo se concentrará na utilização de sistemas IMT-2020 na faixa de 3500-3600 MHz e sua convivência com os sistemas de TVRO na Banda C (3625-4200 MHz).

O estudo demonstra-se relevante considerando os critérios estabelecidos pelo Ministério das Comunicações para a proteção dos usuários que recebem sinais de TV aberta e gratuita por meio de antenas parabólicas na Banda C satelital, adjacente à faixa de 3,5 GHz.

2.2 ESTAÇÕES DE RECEPÇÃO DOMÉSTICA DE TELEVISÃO VIA SATÉLITE (TVRO – TV RECEPTION ONLY)

Tendo em consideração que as estações de recepção doméstica dos sistemas de TVRO fazem parte dos sistemas do serviço fixo por satélite, segue uma breve explicação sobre este serviço.

2.2.1 O SERVIÇO FIXO POR SATÉLITE

O serviço fixo de satélite (FSS, do inglês *Fixed Satellite Service*), conforme item 1.21 do artigo 1 do Regulamento de Radio da UIT (RR) [28], é definido como:

“um serviço de radiocomunicação entre estações terrenas em determinadas posições, quando um ou mais satélites são usados; a posição dada pode ser um ponto fixo especificado ou qualquer ponto fixo dentro de áreas especificadas; em alguns casos, este serviço inclui enlaces entre satélites, que também podem ser operados no serviço inter-satélite (ISS); o serviço fixo por satélite também pode incluir enlaces de alimentação (*feeder links*) para outros serviços de radiocomunicações espaciais”.

Em outras palavras, o serviço fixo por satélite envolve principalmente comunicações entre estações terrestres fixas via satélite, incluindo enlaces entre satélites de alimentação. Este serviço pode incluir comunicações para múltiplos locais fixos especificados, excetuando-se transmissões de radiodifusão.

Utilizado em nível mundial, possui aplicações em níveis nacional e internacional, sendo utilizado em aplicações governamentais, de segurança pública, incluindo emergência, prevenções de riscos de acidentes naturais e auxílio a desastres, meteorologia, redes privadas, redes militares, entre outras, ou seja, de diversas maneiras e formas. Nas Figuras 2.5 e 2.6 observam-se algumas possíveis topologias típicas do serviço fixo por satélite, conforme os Relatórios ITU-R S.2278 [35] e ITU-R S. 2151 [36].

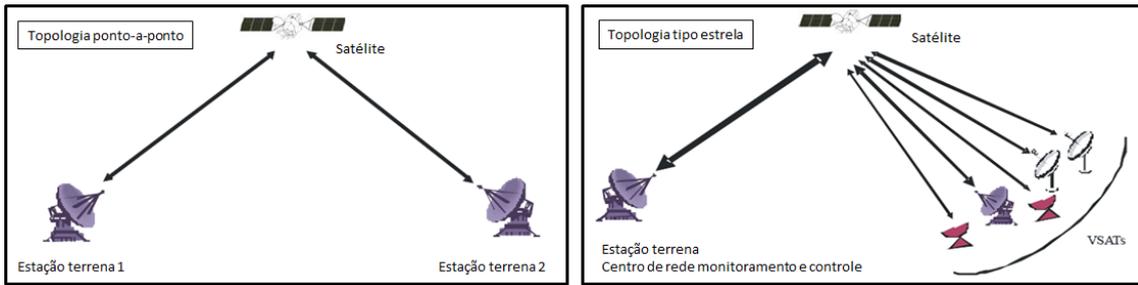


Figura 2. 5 - Exemplos de topologias típicas do FSS
(Rel. ITU-R S.2278)

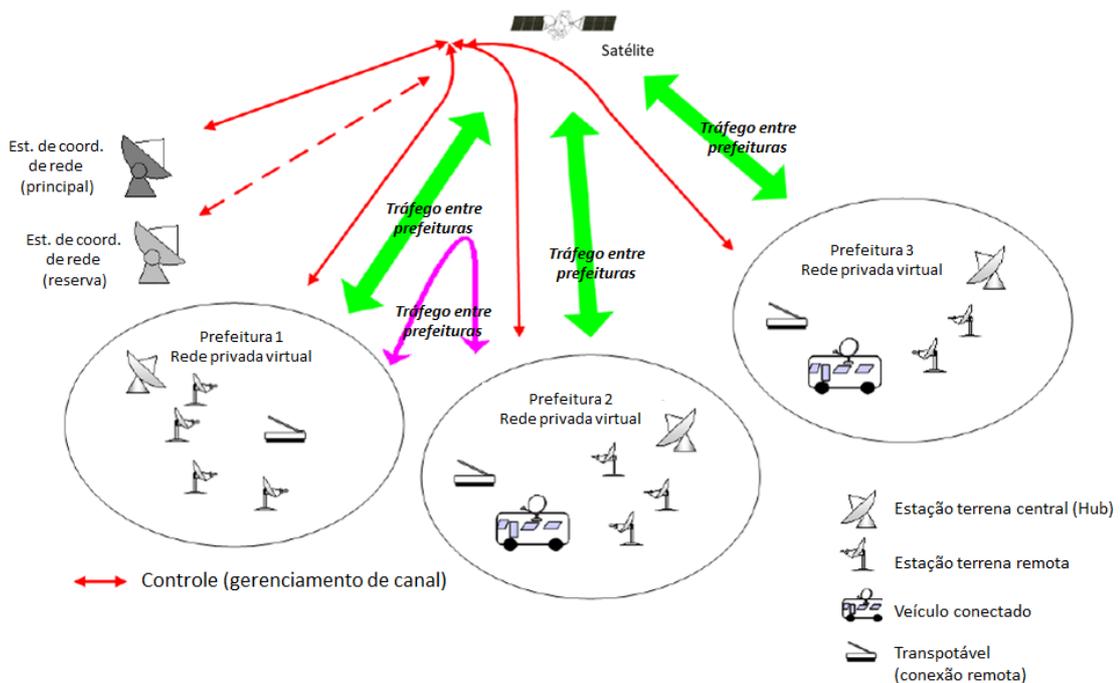


Figura 2. 6 - Exemplos de topologias típicas do FSS para uma rede de emergência
(Rel. ITU-R S. 2151)

O FSS opera em diversas faixas de frequências, como por exemplo Banda C (3,6 – 8 GHz), Banda X (8 – 12 GHz), Banda Ku (12 – 18 GHz), Banda Ka (26 – 40 GHz) e V (40 – 75 GHz), possuindo ainda atribuições para aplicações em Banda W (75 – 110 GHz) e entre faixas mais altas da ordem de 120 - 130 GHz, 160 – 180 GHz, 210 – 240 GHz e 270 GHz.

A UIT-R possui uma série de recomendações e relatórios a respeito deste tipo de serviço, que orientam e recomendam sua utilização ampla e mundial.

2.2.2 A BANDA C

Considerando os objetivos deste trabalho, neste item apresenta-se um breve resumo sobre a Banda C, usada amplamente por sistemas TVRO, e, a seguir, caracterizam-se os sistemas TVRO propriamente ditos.

A faixa de frequências de 3600-4200 MHz, chamada de Banda C, é atribuída em nível mundial ao Serviço Fixo por Satélite (FSS). Utilizada há mais de 40 anos para FSS, a faixa é considerada como uma tecnologia madura que oferece equipamentos a baixos custos e com uma ampla cobertura e, por este motivo, representa papel importante na infraestrutura de telecomunicações de muitos países, como por exemplo Estados Unidos, Reino Unido, Rússia, França, Coréia do Sul, Finlândia e Suécia, e especialmente naqueles em desenvolvimento, dentre eles o Brasil [37].

Também é utilizada em nível governamental em diversos países, e em nível internacional pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, do inglês *World Meteorological Organization*), o qual é essencial para a aviação civil e para alertas meteorológicos, hídricos, climáticos e ambientais.

Os serviços de satélites nesta faixa incluem redes de terminais de abertura muito pequena, chamadas de antenas VSAT (do inglês *Very Small Aperture Terminal*), serviços de internet, enlaces ponto-a-ponto, radiodifusão por satélite, serviços móveis por satélites, telemetria, meteorologia, entre outros.

No Brasil estes sistemas que operam na Banda C encontraram uma ampla possibilidade de crescimento em um número alto de domicílios, devido ao seu custo muito baixo, sendo que a operação destes satélites no país inicia-se em 3625 MHz ou acima, nas quais as estações licenciadas utilizam antenas VSAT e possuem coordenadas geográficas conhecidas. A Figura 2.7 exemplifica a quantidade de estações licenciadas no Brasil no ano de 2007 (a mais atualizada encontrada pelo autor deste trabalho), com o objetivo de demonstrar a distribuição destas no território nacional.

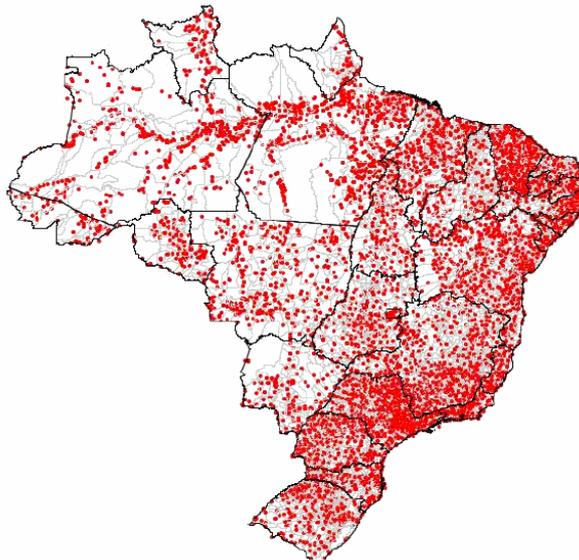


Figura 2. 7 - Estações licenciadas de FSS no Brasil na faixa de 3625 – 4200 GHz (2007)

2.2.3 SISTEMAS DE TVRO

Dentre as aplicações utilizadas no FSS na Banda C, destacam-se as estações de recepção doméstica de televisão via satélite, TVRO, que são uma aplicação do serviço fixo por satélite que foi o principal meio de recepção de satélite de consumo nos Estados Unidos e Canadá até meados da década de 1990.

Um sistema de TVRO recebe o sinal de satélite na faixa de frequência de 3625-4200 MHz, e o processa por meio de um conversor descendente de bloco de baixo ruído (LNB, do inglês *low noise block downconverter*), e, posteriormente, envia este sinal para a TV.

Na Figura 2.8 é apresentada uma antena parabólica recebendo os sinais de satélite, e um diagrama de blocos do LNB, no qual o sinal recebido é filtrado em um filtro passa faixa na Banda C, a seguir é amplificado pelo amplificador de baixo ruído (LNA, do inglês *low noise amplifier*), e, posteriormente, o sinal resultante é convertido por um oscilador local e mixer para uma frequência intermediária na banda L (1–2 GHz), sendo, por fim, filtrado e amplificado novamente para ser enviado a TV.

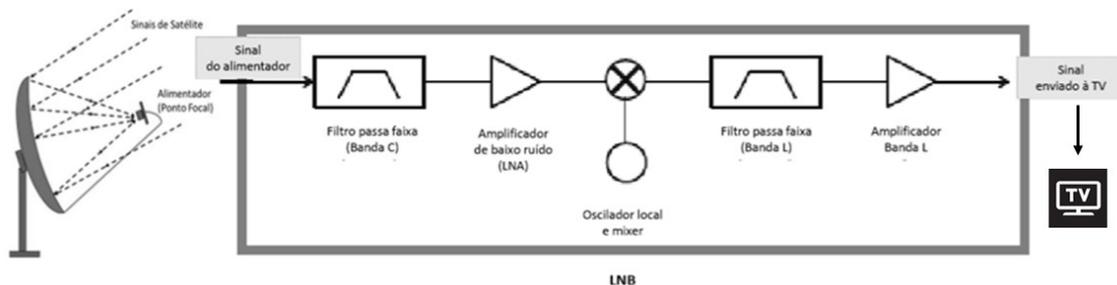


Figura 2. 8 – Diagrama de blocos do LNB

2.2.4 SISTEMAS DE TVRO NO BRASIL

No Brasil, os sistemas de TVRO são largamente utilizados em diversas regiões do país, com estimativa da ordem de 20 milhões de usuários [14]. Apesar desta ampla utilização, o funcionamento destes sistemas não encontra respaldo na regulamentação da Anatel, ou seja, seu uso não é regulamentado, não possuindo direito de proteção contra interferências prejudiciais oriundas de sistemas já regulamentados.

A maioria dos equipamentos LNB vendidos no mercado brasileiro é de baixo custo e qualidade, e não possui um filtro de Banda C, mas apenas um filtro de Banda L, sendo que o receptor do sistema tem uma resposta de frequência relevante ao longo de toda a faixa de 3400-4200 MHz. Desta forma, existe uma grande possibilidade de ocorrência de interferência prejudicial nos receptores dos sinais de satélites no caso de um sistema regulamentado operar nas faixas adjacentes ao FSS, de 3400-3600 MHz. Adicionalmente, o limite de sobrecarga do sistema de recepção TVRO é muito baixo, chegando em alguns modelos na ordem de -60 dBm (Oth = -60 dBm)

Assim, conforme as características do sistema em operação na faixa adjacente (maior potência de transmissão, altura e/ou ganho de antenas, por exemplo, considerando o sistema IMT-2020), o nível do sinal entrante no LNA pode ser superior aos -60 dBm, causando uma sobrecarga e, conseqüentemente, interferência por saturação no sistema de TVRO.

Este problema poderia ser facilmente resolvido com a inserção de um filtro passa faixa entre o alimentador e o LNB. Entretanto, a maioria das estações de TVRO no Brasil tem o

alimentador e o LNB combinados em uma única unidade, denominada LNBF (LNB *Feedhorn*), e, portanto, a inserção deste tipo de filtro em um produto de mercado é inviável.

Neste trabalho, por motivo de simplificação nas exposições, e considerando que estamos tratando apenas o caso em equipamentos do Brasil, denominaremos o receptor de TVRO de LNBF (não devendo ser confundido com o “*set-top box*”, nome usualmente utilizado para o conversor, decodificador ou receptor de televisão).

A explicação do problema de interferência que ocorre nos sistemas de TVRO no Brasil será explicada de maneira mais detalhada no próximo item deste capítulo.

2.3 INTERFERÊNCIAS

De acordo com o item 1.166 do Regulamento de Rádio da UIT (RR), interferência é definida como:

“O efeito da energia indesejada devido a uma emissão ou combinação de emissões, radiações ou induções na recepção de um sistema de radiocomunicação, manifestada por qualquer degradação de desempenho, má interpretação ou perda de informações que possam ser extraídas na ausência de tal energia indesejada.”

Desta forma, são possíveis tipos diferentes de interferências, que podem ou não afetar um sistema de recepção, e, portanto, causar ou não degradação perceptível do sinal recebido.

Conforme o tipo, a UIT define os tipos de interferências no RR em:

- a) Permissíveis, que são aquelas que cumprem com determinados critérios estabelecidos pelas regulamentações ou recomendações da UIT;
- b) Aceitáveis, aquelas com níveis maiores do que os indicados pela UIT, mas acordadas entre duas ou mais administrações e que não prejudiquem outras administrações; e
- c) Prejudiciais, aquelas que comprometem o funcionamento de um serviço de radionavegação ou de outros serviços de segurança, ou degrada gravemente, obstrui ou repetidamente interrompe um serviço de radiocomunicações operando de acordo com o RR.

Adicionalmente, os tipos de interferência podem também ser classificados como sendo [38]:

- a) Interferência co-canal, que é proveniente de um sinal indesejado que possui a mesma portadora do sinal desejado na recepção; e
- b) Interferência de canal adjacente, que é proveniente de um sinal indesejado que possui portadora em uma faixa adjacente à portadora do sinal desejado, ou seja, o nível de interferência recebido depende do vazamento espectral do transmissor interferente e do desempenho de seletividade (bloqueio) do receptor.

Especificamente tratando de interferências causadas pela transmissão de sinais de sistemas IMT na recepção dos sistemas fixos por satélites, tendo por base o Relatório ITU-R M.2109 [37] (e outras referências citadas nesta dissertação), os tipos de mecanismos que podem ocorrer são:

- a) Interferência dentro da faixa de operação, quando os sistemas operam na mesma faixa, e, neste caso, ocorre o efeito chamado bloqueio;
- b) Interferência devido a emissões fora de faixa (OOBE) e espúrias do IMT operando em faixa adjacente a dos sistemas FSS;
- c) Operação não linear (dessensibilização) do receptor de FSS, quando o equipamento deixa de responder adequadamente antes de saturar completamente;
- d) Saturação do receptor do FSS.

2.3.1 EXPLICAÇÃO DO PROBLEMA DE INTERFERÊNCIA DO IMT NA TVRO

Na Figura 2.9 temos a exemplificação de como se dá a interferência causada por sistemas IMT operando na faixa de 3,4 – 3,6 GHz em sistemas TVRO.

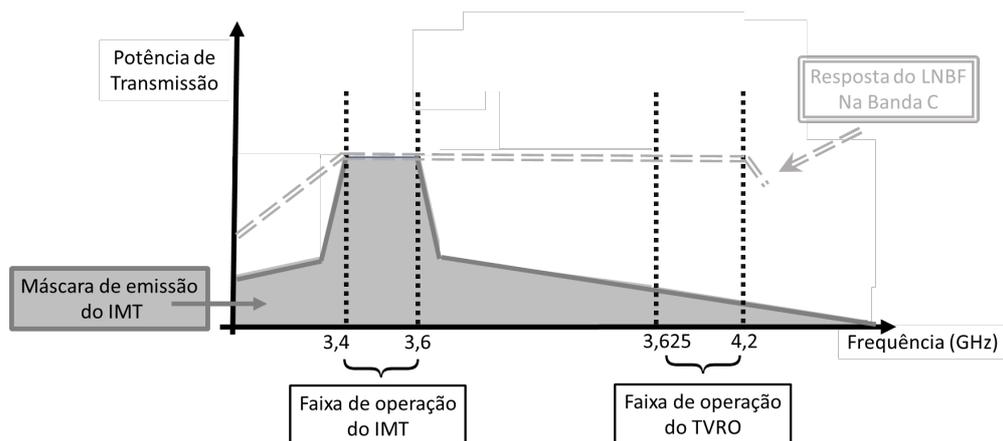


Figura 2. 9 – Diagrama de interferências entre sistemas IMT-2020 e TVRO em 3,5 GHz

Observa-se que, embora a faixa de operação da TVRO seja 3,625 – 4,2 GHz, a resposta do LNBf acontece em toda Banda C (3,4 – 4,2 GHz)¹. Desta forma, o sinal proveniente do IMT-2020 operando na faixa de 3,4 – 3,6 GHz ocasiona uma alta interferência no LNBf, podendo levar à sua saturação e impossibilitar qualquer tipo de recepção. Caso o sistema FSS operasse em toda a Banda C, o IMT provocaria adicionalmente uma interferência co-canal na faixa de 3,4 – 3,6 GHz com o consequente bloqueio do sinal recebido pelo LNBf nesta faixa (este caso não está sendo examinado nesta dissertação).

Por outro lado, na faixa de 3,625 – 4,2 GHz o LNBf recebe emissões espúrias fora de sua faixa de operação (OOBE, do inglês *Out-of-band emission*), provenientes do sistema IMT, que, conforme a sensibilidade de saturação do LNBf, podem vir a causar interferências prejudiciais à recepção de TVRO. Este fenômeno também é chamado tecnicamente de ACLR (*adjacent channel leakage ratio*), podendo ser traduzido como taxa de vazamento do canal adjacente.

Uma outra forma de representar graficamente as interferências causadas pelo sistema IMT no sistema de TVRO na Banda C é apresentada na Figura 2.10, onde indica-se o nível a

¹ Incluindo-se nesta faixa a chamada Banda C estendida de 3,4 – 3,7 GHz.

partir do qual o LNBF atinge a saturação, e, novamente, as emissões espúrias provenientes do sistema IMT fora de sua faixa de operação (OOBE). Neste caso, a figura explicita também a possibilidade de uma banda de guarda que possa proteger o sistema de TVRO de interferências prejudiciais, o que é uma medida efetiva para proteção do sistema considerando casos específicos.

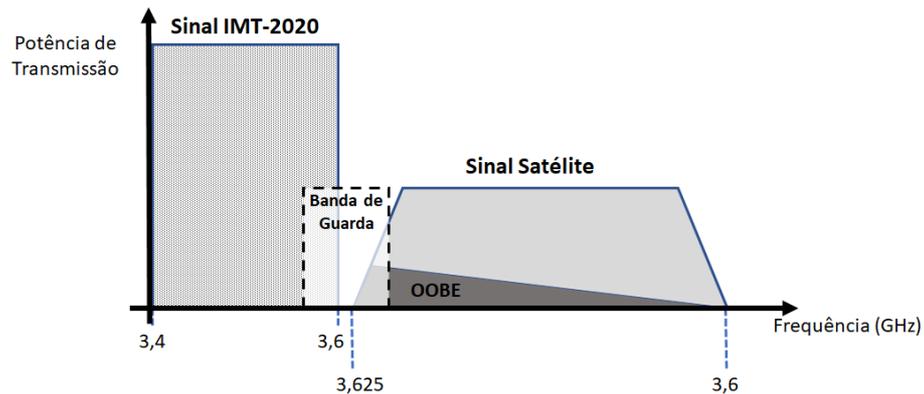


Figura 2. 10 – Diagrama de interferências entre sistemas IMT-2020 e TVRO em 3,5 GHz, considerando banda de guarda

Outras medidas protetivas eficientes são a distância de separação entre sistemas, a potência transmitida pelo sistema IMT, características técnicas do transmissor e do receptor, modelo de propagação, técnicas de blindagem física dos sistemas, antenas inteligentes e adaptativas com conformação de feixe, que devem ser estudadas e aplicadas conforme os casos específicos de aplicação.

2.3.2 INTERFERÊNCIAS EM SISTEMAS DE TVRO NO BRASIL

Conforme os relatórios dos estudos feitos pela Anatel, apresentados no Capítulo 3 desta dissertação, os principais mecanismos de interferência conhecidos na recepção dos sistemas de TVRO são:

- a) Saturação do receptor de TV, que ocorre em banda L;
- b) Interferência no oscilador local do LNB/LNBF, devido à baixa isolamento em relação ao misturador de entrada;
- c) Saturação e/ou intermodulação no LNB/LNBF, ocasionada pelo nível excessivo do sinal (agregado) na entrada;

- d) Superposição dos sinais convertidos, que independe do nível de potência interferente, que ocorre no LNBF multiponto.

Existem algumas medidas possíveis para mitigar a interferência entre sistemas IMT e os sistemas de satélite. A adição de um filtro de entrada à estação terrena, técnicas de isolamento geográfico, instalação de blindagem nos equipamentos receptores, substituição do sintonizador do LNBF, redução da potência de transmissão das estações base dos sistemas IMT, ajuste da direção máxima de radiação das antenas das estações base dos sistemas IMT, entre outros.

Adicionalmente, o uso de um filtro externo na frente de LNBs profissionais garante uma proteção eficaz contra interferência da faixa adjacente, conforme demonstrado nos estudos realizados pela Anatel.

As medidas protetivas descritas no item anterior também podem ser aplicadas conforme o caso específico.

2.3.3 IMPACTOS DO PROBLEMA DE INTERFERÊNCIA NO BRASIL E NECESSIDADE DE ESTUDOS

As estações de TVRO utilizadas no Brasil não possuem regulamentação nacional, não sendo licenciadas no país, e, em consequência, não têm direitos de proteção contra interferências prejudiciais causadas por outros sistemas e, devido ao baixo investimento em tecnologia utilizado na sua produção, possuem qualidade de filtragem inadequada nas faixas utilizadas, conforme esclarecido anteriormente.

Apesar disso, conforme as estimativas não oficiais de cerca de 20 milhões de usuários destes tipos de sistemas no Brasil, há um custo social não desprezível na implantação de um novo serviço, motivo pelo qual estudos de convivência são necessários antes de implementar novos sistemas de telecomunicações nas faixas utilizadas pela TVRO ou ainda em faixas adjacentes, de forma a não causar um impacto negativo nas residências que utilizam tais sistemas.

Uma implantação de novos sistemas de IMT-2020 na faixa de 3,5 GHz que causasse interferências prejudiciais em uma parcela ou totalidade destes LNBFs, além de causar prejuízos a um número significativo de cidadãos brasileiros, certamente traria impactos negativos para o governo brasileiro, bem como questionamentos sobre a implementação dos

novos sistemas e os trabalhos realizados pela Anatel que antecederam a decisão de utilização da faixa pelos novos sistemas móveis de 5ª Geração.

2.4 CONVIVÊNCIA E COMPATIBILIDADE ENTRE SISTEMAS

Devido à preferência de utilização de certas porções do espectro de frequências por diversos tipos de serviços, por suas características de propagação proporcionarem uma melhor cobertura, maiores taxas de transmissão ou ainda proporcionarem certas especificidades, como por exemplo no caso de faixas para as aplicações de radioastronomia ou meteorologia, torna-se necessário compartilhar faixas de frequência entre diferentes tipos de sistemas e aplicações.

Para que seja garantida uma coexistência satisfatória entre os sistemas envolvidos, é importante realizar estudos no sentido de calcular a possibilidade de potencial interferência entre eles, por meio da utilização de modelos de predição de propagação e métodos de simulação de convivência e compatibilidade eletromagnética, com certo nível de precisão e confiabilidade.

Desta forma, recomendações e relatórios da UIT já foram desenvolvidos com métodos e orientações para a realização destes tipos de estudos, de forma que se alcance uma garantia mínima de convivência e compatibilidade entre os diversos serviços, quando haja a necessidade ou possibilidade de compartilhamento de faixas de frequências, ou ainda quando haja possibilidade de interferências prejudiciais em faixas adjacentes aos novos serviços entrantes.

Neste ponto, ressalta-se que a cada novo ciclo de estudos, período geralmente de 4 anos entre a conclusão de uma conferência mundial de radiocomunicações e o início de outra, novos estudos de compartilhamento e compatibilidade são realizados conforme as necessidades impostas pelos itens de agenda da próxima conferência. Desta forma, pretende-se garantir uma convivência livre de interferências prejudiciais entre os sistemas em operação e os sistemas entrantes.

Para exemplificação, além daquelas recomendações e relatórios específicos citados nesta dissertação, podem ser relacionadas como recomendações gerais relacionadas à propagação, utilizadas para estudos de convivência e compatibilidade, as seguintes:

- a) Recomendação ITU-R P.452-16 - Procedimento de previsão para a avaliação de interferência entre estações na superfície da Terra em frequências acima de 0,1 GHz [39];

- b) Recomendação ITU-R P.619-4 - Dados de propagação necessários para a avaliação da interferência entre as estações no espaço e aquelas na superfície da Terra [40];
- c) Recomendação ITU-R P.2041-0 – Previsão de atenuação do caminho nas ligações entre uma plataforma aérea e o Espaço e entre uma plataforma aérea e a superfície da Terra [41];
- d) Recomendação ITU-R P.2108-0 – Previsão de perda por obstruções (*clutter loss*) [42];
- e) Recomendação ITU-R P.2109-1 – Previsão de perda de entrada em edifício [43].

Desta forma, utilizando-se do arcabouço técnico e regulatório emanado pela UIT, são realizados estudos de engenharia, simulações, testes em campo, conforme o caso, que apresentem dados comprovados e mundialmente, ou ao menos regionalmente, aceitos, que resultem numa conclusão de aceitável possibilidade de coexistência, compatibilidade e compartilhamento, conforme o caso, entre os serviços chamados entrantes (aqueles aos quais serão atribuídas novas faixas de frequências) e o serviços existentes, também chamados de incumbentes (aqueles que já possuem faixas atribuídas).

Apenas após a realização destes estudos e comprovações, que geralmente convergem e resultam em resoluções, recomendações e/ou relatórios da UIT, e com a anuência dos Estados Membros participantes da conferência mundial de radiocomunicações da UIT, uma faixa de frequência é atribuída a um novo serviço dito entrante e procedem-se as alterações necessárias nos Regulamentos de Radio da entidade.

Considerações sobre estudos de convivência

Os estudos de convivência tradicionais consideram diagramas de radiação (envoltórias de antena), seguindo, por exemplo, a Recomendação ITU-R F.1336-5 [44], que traz padrões de referência para antenas omnidirecionais, setoriais e outras antenas para serviços fixos e móveis para uso em estudos de compartilhamento na faixa de frequência de 400 MHz a 70 GHz. Os padrões utilizados na recomendação se aproximam às medidas apresentadas em estudos na própria UIT-R.

A Recomendação ITU-R F.1336-5, utilizada extensivamente em estudos internacionais para compartilhamento e convivência de diversos serviços com os serviços móveis, traz um anexo dedicado a padrões para antenas setoriais utilizadas em redes móveis nas faixas de 400 MHz a 6 GHz.

Por outro lado, para realizar estudos de compatibilidade e compartilhamento de Sistemas IMT foi desenvolvida a Recomendação ITU-R M.2101-0 [45], uma vez que as características destes sistemas diferem em relação aos sistemas móveis anteriores (até a 3ª Geração – 3G).

Esta recomendação traz uma metodologia onde são apresentados os cenários de uso mais específicos que são previstos nas redes móveis de 4ª Geração em diante, já citados anteriormente na seção sobre IMT-2020:

- a) aplicações de banda larga móvel aprimorada (eMBB), resultado da aplicação de tecnologias com maior eficiência espectral em grandes quantidades de espectro, permitindo serviços com maiores taxas de dados;
- b) comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC), que permitam o controle e automação de processos dinâmicos em tempo real em vários campos, como por exemplo processos industriais e manufatura, distribuição de energia, sistemas de transporte inteligentes, que requerem comunicação com altíssima confiabilidade e disponibilidade; e
- c) aplicações de conexões massivas máquina-máquina, o que se trata de conectividade para um grande número de dispositivos de baixo custo e baixo consumo de energia no contexto da Internet das Coisas (IoT).

A metodologia considera também redes móveis de acesso em diversos ambientes e áreas de cobertura, que podem ser combinados conforme o caso específico, associadas aos respectivos modelos de propagação para estudos de compartilhamento, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2. 1 - Cenários de Redes Móveis de Acesso (Rec.ITU-R M.2101-0)

Localização da Estação Base	Área de cobertura ampla	Área de cobertura pequena
Rural	Macro rural	Não aplicável
Suburbana	Macro suburbana	Micro suburbana
Urbana	Macro urbana	Micro urbana
Interna (Indoor)	Não aplicável	Interna (Indoor)

A Recomendação ITU-R M.2101-0 é utilizada neste estudo pois se aplica ao caso específico da simulação de compatibilidade e compartilhamento entre sistemas IMT-2020 e TVRO na faixa de 3,5 GHz, com a utilização de antenas com conformação de feixe nas redes móveis, que permitem o apontamento elétrico de feixes de alta diretividade,

3 ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA ANALISADOS

Alguns estudos de convivência entre sistemas IMT e sistemas por satélites foram examinados com o intuito de servirem como base de orientação para o trabalho aqui apresentado; são eles:

- a) Estudos de convivência entre sistemas IMT-2020 (5G) e TVRO na faixa de 3,5 GHz realizados pela Agência Nacional de Telecomunicações (2019 e 2020) [46];
- b) Condições de coexistência entre sistemas IMT-*Advanced* (4G) na faixa de 3400 – 3600 MHz e TVRO na faixa de 3625 – 4200 MHz no Brasil GHz (2017) [47];
- c) Relatórios da UIT: ITU-R M.2109 (2007) [37] e ITU-R S.2368-0 (2015) [48], contendo estudos de compartilhamento entre sistemas IMT-*Advanced* (4G) e redes de satélites geo-estacionários no FSS nas faixas de 3400 – 4200 MHz e 4500 – 4800 MHz;
- d) Coexistência entre sistemas LTE-*Advanced* (4G) e serviços FSS na faixa de 3500 – 3700 MHz na Colômbia (2020) [49];
- e) Estudos de convivência, interferência e compartilhamento entre IMT-2020 (5G) e FSS em ondas milimétricas (faixas de 24,25-27,5 GHz, 37-42,5 GHz e 42,5-43,5 GHz (2016 a 2019).

Ressalta-se que os estudos citados em e) também utilizaram a ferramenta SHARC [15] para suas simulações.

A seguir são apresentados resumos dos trabalhos examinados, com o intuito de trazer de forma objetiva as suas conclusões, aprofundados conforme a especificidade e relevância aos estudos desta dissertação.

3.1 ESTUDOS REALIZADOS PELA ANATEL

Nos anos de 2019 e 2020 a Agência Nacional de Telecomunicações elaborou cinco relatórios com uma série de estudos e testes de convivência e compatibilidade entre sistemas móveis de 4^a a 5^a Geração (4G e 5G) operando na faixa de 3,5 GHz e sistemas de recepção de

satélite TVRO na Banda C, que foram apresentados em reuniões do Comitê de Uso do Espectro e de Órbita da Agência (CEO) e estão disponíveis publicamente [46], sendo, cada um deles, relatórios finais do seu tema específico, conforme segue:

- a) Relatório de testes de sistemas de recepção profissionais de TVRO disponíveis no mercado brasileiro no ano de 2019, e com produtos nos quais foram realizadas melhorias com o objetivo de minimizar interferências (testes de laboratório em 2018 e de campo em 2019);
- b) Relatório de simulações realizadas com sistemas domésticos de TVRO utilizados no Brasil (maio de 2020);
- c) Relatório de estudo teórico dos impactos das interferências em sistemas profissionais de recepção de TVRO (maio de 2020);
- d) Relatório de novos testes de campo em 2020 com sistemas melhorados de recepção de TVRO, com base nos resultados dos testes de campo realizados em 2019 (outubro de 2020);
- e) Relatório de complementação dos testes de campo em 2020 (dezembro de 2020).

Segue um breve resumo para contextualização e a seguir estes estudos são apresentados com maiores detalhes.

O primeiro relatório, de julho de 2019, descreve uma série de ensaios e simulações, realizados no laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) em outubro de 2018, em Campinas, São Paulo, para caracterização dos dispositivos utilizados na recepção de TVRO (LNBS profissionais e LNBSFs). Os resultados demonstraram que a maioria dos dispositivos LNBSF testados não funcionaram adequadamente com um sinal interferente acima de -60 dBm em sua entrada, devido, de modo geral, à baixa qualidade destes dispositivos, sendo também demonstrado que o uso de um filtro externo na frente do LNBS profissional protege de forma eficaz o dispositivo contra interferência da faixa adjacente.

No mesmo relatório são descritos testes em campo realizado em 2019, no Centro de Referência Tecnológica da Claro (CRT), na cidade do Rio de Janeiro, onde foi avaliada a convivência entre sistemas IMT (4G e 5G – faixa de 3,4 - 3,6 GHz) e sistemas de TVRO (3,625 – 4,2 GHz) considerando situações críticas, interferências e possíveis medidas de mitigação, onde concluiu-se que LNBSFs de mercado não possuem robustez adequada para mitigar interferências em cenários críticos de interferência prejudicial, como os dos ensaios executados.

O segundo relatório, datado de maio de 2020, apresentou uma simulação de avaliação e condições de convivência entre sistemas 5G (faixa de 3,3 - 3,7 GHz) e sistemas de TVRO

domésticos utilizados no Brasil (faixa de 3,8 – 4,2 GHz), com banda de guarda de 100 MHz, utilizando o método de Monte Carlo e recomendações da UIT, avaliando a probabilidade de que a interferência agregada das diversas estações 5G causasse saturação na recepção do LNBF da estação TVRO. Concluiu-se que o uso de LNBFs mais robustos pode mitigar a potencial interferência das redes 5G na recepção das TVROs, sendo que o uso combinado com antenas parabólicas de melhor qualidade potencializa essa solução. Ressalta que a convivência entre IMT-2020 e TVRO é possível se forem disponibilizados LNBFs de melhor qualidade.

No terceiro relatório, também de maio de 2020, foi apresentado um estudo teórico dos impactos das interferências e emissões nos sistemas profissionais que conclui que a coexistência entre 5G e sistemas profissionais do FSS em faixas adjacentes é viável e que a combinação de LNBFs comuns e filtro passa faixa resolve a maioria dos problemas de interferência quando o sinal 5G estiver a pelo menos 50 MHz da faixa de operação do LNB.

O quarto relatório, datado de outubro de 2020, apresenta novos testes de campo no Rio de Janeiro entre sistemas 5G (3,3 – 3,7 GHz, utilizando até duas portadoras de 100 MHz), e sistemas de TVRO domésticos utilizados no Brasil (3,8-4,2 GHz), com LNBFs denominados de “nova geração”, com melhorias realizadas a partir dos resultados dos testes anteriores, considerando situações críticas, interferências e possíveis medidas de mitigação. De forma geral concluiu-se que um dos LNBFs de “nova geração” seria suficiente para mitigação da maioria das situações de interferência entre os sistemas, porém outras ações são sugeridas no relatório como por exemplo aumentar a banda de guarda entre os sistemas, utilização de menor nível de potência na direção da TVRO, entre outras.

Por fim, o quinto relatório, datado de dezembro de 2020, complementar ao anterior, apresenta resultados de testes em campo realizados no Rio de Janeiro que avaliaram a convivência entre sistemas 5G (na faixa de 3,4 - 3,7 GHz, utilizando até três portadoras de 100 MHz) e o Serviço Fixo por Satélite para uso profissional em sistemas de recepção de satélite TVRO, com LNBFs com filtros de mercado (na faixa 3,7 GHz - 4,2), considerando situações críticas, interferências e possíveis medidas de mitigação. Concluiu-se que podem ser utilizadas diversas bandas de guarda em função dos valores suportados pelos dispositivos profissionais disponíveis no mercado, e que o filtro para a proteção do FSS pode necessitar de uma customização da seletividade em função da faixa de frequência utilizada pelo IMT-2020.

Feito esse pequeno sumário acima, apresenta-se com um maior detalhamento os cinco estudos realizados.

Salienta-se que toda a caracterização destes testes se encontra devidamente relatada nos relatórios finais apresentados no Comitê de Uso do Espectro e de Órbita da Anatel, sendo públicos no site da Anatel, conforme anteriormente informado.

3.1.1 RELATÓRIO DOS TESTES DE CONVIVÊNCIA ENTRE O IMT OPERANDO NA FAIXA DE 3,5 GHZ E SISTEMAS SATELITAIS OPERANDO EM FAIXA ADJACENTE (TESTES DE LABORATÓRIO E DE CAMPO – 2018/2019)

Neste estudo, realizado pela Anatel, e apresentado em julho de 2019, com a participação de colaboradores externos (empresas das indústrias de radiodifusão, satélite e móvel), foram realizados testes de laboratório e de campo, com produtos de recepção de TVRO (LNBF) disponíveis no mercado brasileiro no ano de 2019 e também com produtos nos quais foram realizadas melhorias com o objetivo de minimizar interferências.

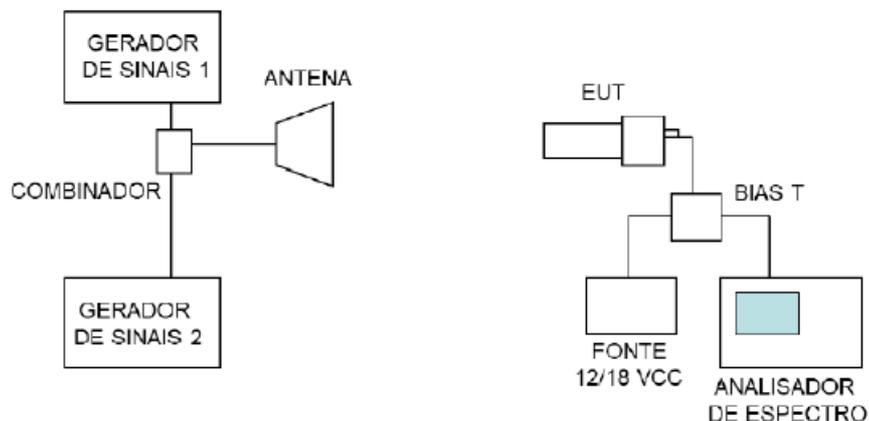
Os testes de laboratório foram realizados para a caracterização dos dispositivos utilizados na recepção de TVRO, conforme caderno de testes disponível no estudo e nos testes de campo, e foi avaliada a convivência entre os sistemas IMT operando na faixa de 3,5 GHz, 4G e 5G, e sistemas de recepção de satélite em especial o de TVRO.

Toda a caracterização destes testes encontra-se devidamente relatada no relatório final apresentado no Comitê de Espectro e Órbita e constante do site da Anatel.

Testes de Laboratório

Os testes de Laboratório foram realizados entre 9 e 31 de outubro de 2018, no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), em Campinas, São Paulo, contemplando uma série de simulações para a devida caracterização dos dispositivos utilizados na recepção de TVRO, especificamente LNBFs profissionais e LNBFs monoponto e multiponto, considerando simulações computacionais de antenas de diâmetro de 1,7, 1,8 e 2,4 m (com ganho variando da ordem de 30,6 a 37,9 dBi) por meio do software CST Studio Suite.

A configuração dos testes utilizou, ente outros, equipamentos geradores de sinais, analisadores de sinal e de espectro, fonte de ruído, 17 LNBFs, 3 LNBFs profissionais. Os ensaios foram realizados tanto em câmara anecóica como em bancada, conforme o caso. Um exemplo de diagrama de teste de laboratório encontra-se na Figura 3.1.



Fonte: CPqD.

Figura 3. 1 – Exemplo de diagrama de teste de laboratório

A partir dos testes de laboratório constatou-se que nas amostras testadas nenhum LNBF incluía etapa de filtragem do sinal desejado em banda C (3,625 a 4,2 GHz) antes do primeiro estágio do LNA. Consequentemente, a entrada do sinal ocorre diretamente no LNA, fazendo com que os sinais oriundos da faixa adjacente causassem a saturação (resultando em perda de capacidade de recepção em todos os sinais e não apenas naqueles recebidos nas faixas mais baixas da Banda C) e/ou intermodulação do amplificador. Adicionalmente, nos LNBFs multiponto foi observada também a superposição dos sinais convertidos, independentemente do nível de potência interferente.

A maioria dos dispositivos LNBF testados não foram capazes de funcionar adequadamente com um sinal interferente acima de -60 dBm (valor típico) em sua entrada, nas frequências entre 2,9 GHz e 3,6 GHz, devido à baixa seletividade (ampla resposta em frequência) e baixo ponto de compressão. Outros problemas encontrados foram o baixo desempenho mesmo sem interferência externa e a baixa isolamento do oscilador local, e, de modo geral, observou-se a baixa qualidade destes dispositivos. Um ponto importante foi que se observou que o uso do filtro externo na frente do LNB profissional protege de forma eficaz o dispositivo contra interferência da faixa adjacente.

Testes de Campo

Os testes de campo foram realizados no Centro de Referência Tecnológica da Claro (CRT), no Campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) na cidade do Rio de Janeiro, onde existem ecossistemas 4G (LTE, do inglês *Long Term Evolution*) e 5G (IMT-2020) em ambiente externo (outdoor), com antenas instaladas em alturas de 12 e 10 metros respectivamente, na faixa de 3,5 GHz, livre de interferências prejudiciais, constituindo ambiente adequado aos testes realizados.

Foi avaliada a convivência entre sistemas IMT operando na faixa de 3,5 GHz, utilizando tecnologia LTE-TDD (TDD, do inglês *Time Division Duplex*) e/ou IMT-2020 (5G *New Radio Non-Standalone*), com canalização na faixa de frequências entre 3,4 e 3,6 GHz, e sistemas de recepção de satélite em especial o de TVRO operando em 3,625 GHz a 4,2 GHz, conforme Figura 3.2, considerando situações críticas, interferências e possíveis medidas de mitigação.

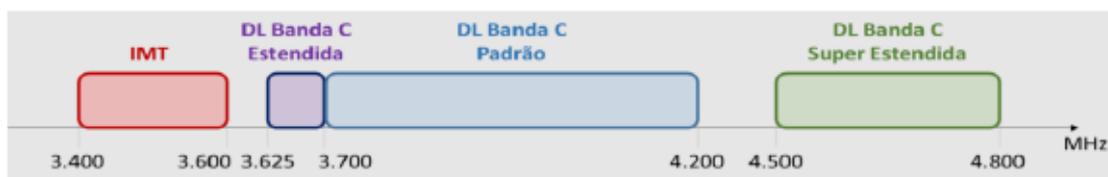


Figura 3. 2 – Faixas examinadas nos testes de campo - 2019

Os testes foram conduzidos em dois cenários: um sendo a interferência do sistema móvel (LTE/IMT-2020) em estações do Serviço Fixo por Satélite licenciadas ou somente receptoras cadastradas, considerados sistemas profissionais e devidamente protegidos por filtros de entrada (proteção do LNA); e o outro sendo a interferência do sistema móvel em sistemas TVRO (uso doméstico) que utilizam LNBFs que limitavam ou toleravam a presença de sinais operando na faixa de 3,4 a 3,6 GHz.

Para cada um dos sistemas interferentes (LTE e IMT-2020) foram configuradas antenas com aberturas setoriais definidas e com conformação de feixe na direção da TVRO, com o sistema em “idle” e com 100% do carregamento de espectro de *downlink*, conformando os dois extremos de eirp que o sistema teria, sendo que a situação de 100% de carga seria a de pior caso. Cabe ressaltar que a situação de 100% de carga não deve ocorrer com frequência em uma rede real pois os feixes (*beams*) serão compartilhados entre diversos usuários distribuídos em regiões distintas da área de cobertura, significando com isso que a eirp. na condição real deve ser, em geral, inferior ao realizado durante os testes.

Os canais dos sistemas móveis utilizados nos testes foram:

- a) Para os sistemas LTE: 2 portadoras de 20 MHz (3560 a 3600 MHz); 2 portadoras de 20 MHz (3520 a 3560 MHz), e 2 portadoras de 20 MHz (3460 a 3500 MHz);
- b) Para os sistemas IMT-2020: 1 portadora de 60 MHz (3540 a 3600 MHz), 1 portadora de 60 MHz (3.480 a 3.540 MHz), e 1 portadora de 60 MHz (3440 a 3500 MHz).

Foi considerado apenas o enlace de *downlink*, uma vez que a eirp do transmissor (LTE/IMT-2020) é significativamente maior quando comparado a e.i.r.p. do equipamento do usuário (UE, do inglês *User Equipment*) e que os transmissores operando no modo TDD possuem configuração padrão para maior ocupação temporal do *downlink*. Os testes foram realizados com configuração de 60% do tempo do quadro alocado para *downlink* e o restante para transição e *uplink* (40%), no sistema TDD.

Foram utilizadas antenas de recepção de TVRO com diâmetros de 1,5 m, 1,6 m 1,9 m e 2,4 m, a uma distância entre 65 a 70 m dos sistemas móveis, conforme a Figura 3.3. Foram testados 4 protótipos de LNBFs, que eram equipamentos melhorados que conjugavam o uso de um LNA “mais robusto” em conjunto com um filtro posicionado após esse LNA, com o objetivo de reduzir o nível do sinal interferente que chegaria ao mixer e aos demais estágios de amplificação em banda L. Adicionalmente foram testadas amostras de mercado, sendo um LNBF monoponto e um LNBF multiponto, e um LNB profissional.



Figura 3. 3 – Configurações dos sítios IMT e TVRO nos testes de campo - 2019

A configuração dos testes, que contou com receptores analógico, digital e analógico/digital, utilizou diversas combinações de antenas, receptores, LNBFs/LNB, e 6 canais de recepção de satélite, sendo 4 digitais com modulação 8-PSK e 2 analógicos.

Buscou-se verificar a condição de recepção sem interferência por 2 minutos e o nível máximo de sinal interferente recebido no LNB-LNBF que não gerasse problemas visíveis na imagem por 2 minutos, tendo por objetivo determinar o valor de potência que provocaria degradação nos sinais recebidos nos cenários 4G e 5G.

Nos testes de campo nenhum dos LNBFs utilizados foi capaz de eliminar totalmente a interferência através de filtragem do sinal na banda adjacente (3,4 a 3,6 GHz) sem a necessidade de redução na potência recebida do IMT. Além disso, aumentar a faixa de guarda do sinal interferente não melhorou de forma considerável a imunidade do sistema, pois o filtro existente se localiza após o primeiro estágio do LNA. Semelhante ao resultado de laboratório, quando ocorre a saturação do LNA, independentemente da frequência de operação do IMT, não é possível a recepção adequada de nenhum canal de TVRO.

No LNBF o filtro em banda L é fundamental para evitar a saturação ou distorção do receptor, minimizando o resíduo do sinal interferente em sua entrada. Observou-se que a susceptibilidade à interferência de recepções com o LNBF multiponto é maior do que com o LNBF monoponto e para o LNBF multiponto foi facilmente observado em campo o comportamento previsto de superposição de sinais.

Novamente confirmando os resultados de laboratório, em campo foi observado que o uso de filtro externo na frente do LNB profissional protege de forma eficaz o dispositivo contra interferência da faixa adjacente.

A amostra do LNBF “melhorado” teve um desempenho muito superior às demais de mercado, na ordem de 15 dB no limiar de interferência nas frequências acima de 3,7 GHz, e na banda C estendida essa melhora de desempenho foi da ordem de 10 dB.

Conclusões Finais do Estudo

Conforme relatado na conclusão do estudo, os testes em campo e em laboratório reforçaram resultados já conhecidos de diversos testes semelhantes realizados anteriormente, ou seja, que os LNBFs de mercado não possuem robustez adequada para mitigar interferências em cenários críticos de interferência prejudicial, como os dos ensaios executados.

Entretanto foi ressaltada que é característica dos sistemas IMT com conformação de feixe que o número de usuários tende a aumentar a distribuição da e.i.r.p. em todo o azimute (Figura 3.4) e, conseqüentemente diminuir a densidade espectral de potência em determinada região ao longo do tempo, e, portanto, os usos em *clutters* (urbano denso, urbano, suburbano, etc.) tendem a diminuir a intensidade do sinal recebido, melhorando então a condição geral de coexistência.

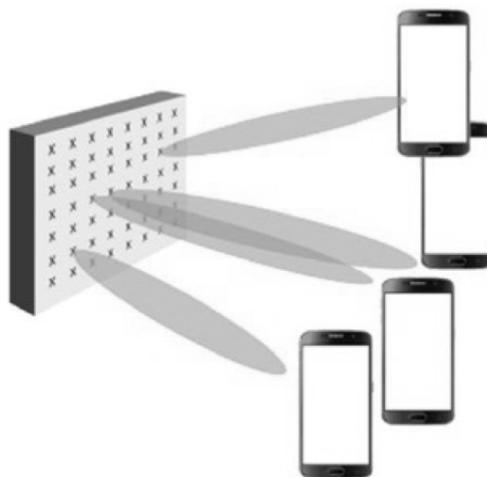


Figura 3. 4 – Distribuição da e.i.r.p. entre terminais de usuários em sistemas IMT com antenas com conformação de feixe

Destacou-se que no sistema profissional, usando filtro externo de banda C estendida, os resultados dos testes indicaram que foi possível utilizar a máxima eirp. do sistema, e que as possibilidades de interferências prejudiciais podem ser facilmente endereçadas no caso em que as estações licenciadas ou cadastradas possuam coordenadas geográficas conhecidas, pois existem soluções técnicas para mitigação, tais como efetuar configurações que bloqueiem o *beamforming* (apontamento eletrônico da antena 5G) na direção da estação do FSS, ou ainda, utilizar anteparos metálicos para proteger os elementos sensíveis do sistema.

Ressaltou-se ainda, nesse caso, conforme estabelece a regulamentação geral de administração do espectro da Anatel, cabe a realização de atividade de coordenação prévia entre as partes no momento da instalação.

Nas condições testadas, os resultados laboratoriais indicaram que alguns modelos de LNBF de mercado podem ser facilmente saturados/intermodulados com sinais da ordem de -60 dBm ou até menos, em frequências a partir de 2,9 GHz, e os resultados em campo demonstraram que o melhor modelo de LNBF “melhorado” suportou em média aproximadamente -45 dBm em sua entrada antes da degradação do sinal de TV.

Citou-se, por fim, que entre os fatores que podem alterar as condições de convivência entre o IMT operando na faixa de 3,5 GHz e sistemas TVRO estão a separação geográfica e/ou anteparos físicos entre os sistemas, ambiente eletromagnético (tipo de *clutter*), potência e.i.r.p de transmissão do IMT, maior banda de guarda, alteração de projetos de LNBFs com melhoria dos filtros na frente do LNA.

3.1.2 ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA ENTRE IMT-2020 E TVRO: SIMULAÇÕES COM SISTEMAS DOMÉSTICOS (MAIO DE 2020)

Neste estudo da Anatel, apresentado em maio de 2020, realizou-se uma simulação de avaliação e condições de convivência entre sistemas 5G operando na faixa de 3,3- 3,7 GHz e TVRO operando na faixas adjacentes de 3,8 – 4,2 GHz da banda C, com banda de guarda de 100 MHz, utilizando o método de Monte Carlo para avaliar a probabilidade de que a interferência agregada das diversas estações 5G possa causar saturação na recepção do LNBF da estação TVRO.

A metodologia adotada seguiu as Recomendações e Relatórios da UIT e as simulações foram realizadas com o software SHARC, utilizando o método de Monte Carlo.

As características dos sistemas IMT são fundamentadas em cenários de macrocélula urbana e suburbana, compatíveis com os apresentados no Relatório ITU-R M.2292-0 – “Características dos sistemas IMT-*Advanced* terrestres para análises de compartilhamento de frequências/análise de interferência” [50] e os parâmetros de entrada utilizados para os sistemas TVRO são aqueles apresentados como viáveis nas discussões sobre o desenvolvimento de LNBFs otimizados (ex.: ponto de compressão P1dB (entrada) \geq -25 dBm).

Desta forma o estudo busca a simulação de convivência entre os sistemas futuros de 5G e os sistemas domésticos de TVRO em utilização no Brasil.

As antenas com conformação de feixes (*beamforming*) e a setorial seguem as Recomendações ITU-R M.2101 e ITU-R F.1336, respectivamente, considerando 100% de carga no *downlink*, conforme a Figura 3.5.

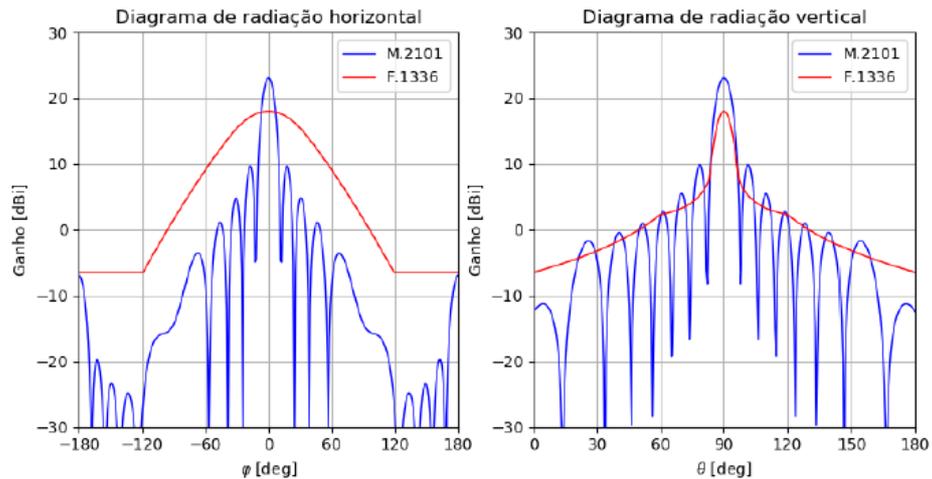


Figura 3. 5 – Diagramas de radiação – Antenas com conformação de feixe e setorial

Conclusão

O estudo conclui que o uso de LNBFs otimizados e robustos pode mitigar a potencial interferência das redes 5G na recepção das TVROs, sendo que o uso combinado com antenas parabólicas de melhor qualidade potencializa essa solução. Ressalta que a convivência entre IMT-2020 e TVRO é possível se forem disponibilizados LNBFs de melhor qualidade, sugerindo ponto de compressão não inferior a -30 dBm na faixa de 3,3 – 3,7 GHz, sendo desejável valores mais robustos, como, por exemplo, -25 dBm ou -20 dBm.

Devido à identificação de eventos de pequena probabilidade nos quais foram recebidos sinais superiores a -20dBm, foi ressaltada a possibilidade de interferência prejudicial mesmo com LNBFs aperfeiçoados, porém ressaltou-se que nestes casos a proteção da TVRO poderia ser tratada pontualmente, com técnicas específicas de mitigação (distâncias mínimas entre sistemas, blindagem da TVRO, troca da antena parabólica, entre outras).

3.1.3 ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-2020 E SISTEMAS FSS PROFISSIONAIS (MAIO DE 2020)

O estudo da Anatel, apresentado em maio de 2020, realizou uma análise teórica determinística, dos impactos das interferências e emissões nos sistemas profissionais para estimar distâncias mínimas para coexistência entre os sistemas IMT-2020 e TVRO, tomando por base diversos cenários, como, por exemplo, o emprego de filtros externos, LNBs 5G *ready*, e/ou a combinação de ambos. Adotou uma abordagem de pior caso, modelando a máxima potência de transmissão, limite de emissão indesejável menos restritivo, menor atenuação no meio de propagação (espaço livre), e uma antena de recepção com o pior diagrama de radiação dentre aqueles avaliados por simulação no laboratório do CPqD, e, por fim, ajustando-se esses elementos para buscar resultados mais realistas, mas ainda assim conservadores.

Avaliação de distâncias mínimas devido às emissões indesejáveis fora da faixa de operação do sistema IMT

O modelo analítico utilizado para o cálculo da distância mínima entre os sistemas IMT-2020 e FSS (TVRO) considera a Recomendação ITU-R P.525 (modelo de espaço livre) [51], a Recomendação ITU-R S.1432 (interferência agregada em FSS) [52], o Relatório ITU-R M.2109 (critérios de proteção para FSS) [37], a Especificação 3GPP TS38.104 (máscaras de espúrios para estações base 5G NR) [53], a Recomendação ITU-R S.465 (ganho da antena da estação terrena) [54], e propostas de valores utilizadas em outras agências reguladoras, entre elas de Hong Kong e dos EUA.

Avaliação de distâncias mínimas devido ao sinal IMT adjacente à faixa FSS

O modelo analítico utilizado para o cálculo da distância mínima de coordenação entre os sistemas IMT-2020 e FSS (TVRO) considera a Recomendação ITU-R P.525 (modelo de espaço livre), valores típicos de operação linear de dispositivos LNB profissionais, potência do sistema IMT de 70 dBm e máximo nível de operação do LNB de -55/-60 dBm.

Conclusões

O estudo conclui que a coexistência entre 5G e sistemas profissionais do FSS em faixas adjacentes é viável e que a combinação de LNBs comuns e filtro passa faixa resolve a maioria dos problemas de interferência quando o sinal 5G estiver a pelo menos 50 MHz da faixa de operação do LNB.

No caso de uma banda de guarda menor pode ser necessário adotar um conjunto de soluções, a depender da isolação entre os sistemas, como redução da potência de transmissão da estação base 5G, distâncias mínimas entre sistemas, isolamento geográfico, uso de filtros mais seletivos, blindagem, substituição do sintonizador, entre outros. Desta forma, combinações específicas de dispositivos e/ou ações de mitigação podem fornecer a proteção adequada para o sistema FSS e maximizar o desempenho deste sistema.

Por fim deve ser ressaltado que, na abordagem de pior caso adotada neste estudo, a ocorrência de dois ou mais parâmetros de entrada conservadores é possível, porém com baixa probabilidade, corroborando a possibilidade de coexistência entre os sistemas.

3.1.4 RELATÓRIO DOS TESTES DE CONVIVÊNCIA ENTRE O IMT OPERANDO NA FAIXA DE 3,5 GHz E SISTEMAS SATELITAIS OPERANDO EM FAIXA ADJACENTE (OUTUBRO DE 2020)

A partir dos resultados dos testes de campo realizados pela Anatel em 2019 (item 3.1.1), fabricantes e outros atores do mercado brasileiro desenvolveram novos protótipos de LNBFs, denominados de “nova geração”, e solicitaram uma nova avaliação destes produtos para a Agência. Desta forma, foram realizados pela Anatel novos testes em campo no ano de 2020, também com a participação de colaboradores e observadores externos (empresas das indústrias de radiodifusão, satélite e móvel).

Foi avaliada a convivência entre sistemas IMT operando na faixa de 3,5 GHz, utilizando tecnologia IMT-2020 (5G *New Radio Non-Standalone* TDD), com canalização na faixa de frequências entre 3,3 e 3,7 GHz, utilizando duas portadoras com largura de faixa de 100 MHz, e sistemas de recepção de satélite TVRO operando em 3,8 GHz a 4,2 GHz, conforme Figura 3.6, considerando situações críticas, interferências e possíveis medidas de mitigação.

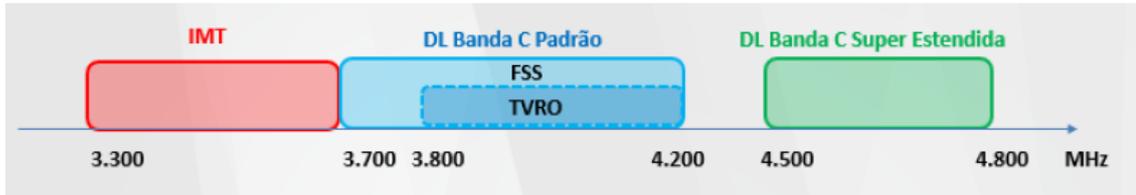


Figura 3. 6 – Faixas examinadas nos testes de campo - 2020

Os LNBFs avaliados nos testes cumpriam os requisitos mínimos de faixa de frequência de entrada de 3,8 – 4,2 GHz, ponto de compressão de 1 dB superior a -30 dBm nas faixas de 3,3 – 3,7 GHz e 4,8 – 4,99 GHz, dentre outros, e considerou-se apenas o enlace de *downlink*.

Nestes testes de campo de 2020, foram introduzidos novos instrumentos para observação dos sinais e realizados testes com duas portadoras com largura de faixa de 100 MHz, com o objetivo de aumentar o nível de controle e exigência em relação aos testes realizados 2019.

Testes de Campo

Os testes de campo foram realizados no Centro de Referência Tecnológica da Claro (CRT), no Campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) na cidade do Rio de Janeiro, onde existem ecossistemas 5G (IMT-2020) em ambiente externo (outdoor), com antenas instaladas em alturas de 10,6 m e 11 m (Huawei), 12 m (Nokia) e 14 m (Ericsson), na faixa de 3,5 GHz, livre de interferências prejudiciais, constituindo ambiente adequado aos testes realizados.

Foram testados 3 LNBFs monopontos protótipos de nova geração, de dois fabricantes distintos, e 1 LNBF monoponto disponível no mercado, este apenas para controle de checagem da correta decodificação do canal de TV satelital sem a presença do sinal interferente. Foram utilizadas antenas de recepção de TVRO com diâmetros de 1,5 m e 1,7 m, a uma distância entre 65 m a 70 m dos sistemas móveis, conforme a Figura 3.7.



Figura 3. 7 – Configurações dos sítios IMT e TVRO nos testes de campo - 2020

A configuração dos testes, que contou com receptores analógico e analógico/digital, avaliou 6 canais de recepção de satélite (4 digitais com modulação digital 8-PSK e 2 analógicos), e os sistemas 5G foram configurados especificamente para maximizar as interferências, com antenas de conformação de feixe configuradas na direção do sistema interferido, com nível de 100% de tráfego no sentido *downlink*.

Buscou-se verificar o limiar de visibilidade através da imagem de vídeo em um monitor de TV, estabelecendo, para os canais analógicos, um padrão visual subjetivo (*threshold of visibility*) que permitisse identificar o início da interferência, e, para os canais digitais, o limiar de interferência estabelecido como sendo o ponto de “congelamento” intermitente da imagem, à medida que se incrementasse a potência do sinal 5G, e a recepção sem interferência por dois minutos (ou cinco quando necessário). Outras características técnicas úteis foram avaliadas, medidas e registradas nos procedimentos de testes adotados.

Nos testes de campo apenas um dos três LNBFs de nova geração atendeu aos requisitos pré-definidos utilizados, apresentando uma seletividade mais adequada, e suportando sinal interferente das duas portadoras simultaneamente (3,55 GHz/100MHz e 3,65 GHz/100MHz) com *beamforming* apontando para as antenas de TVRO. Adicionalmente, ainda quando apresentou degradação de desempenho no início da faixa passante, não se identificou impacto nos canais de TV acima de 3,86 GHz, verificando-se continuidade na resposta linear do dispositivo, e recepção adequada dos canais na faixa.

Os outros dois LNBFs apresentaram diversas situações que afetavam a recepção dos canais recebidos no início da faixa de TVRO, mesmo quando se utilizava apenas a portadora

de 3,55 GHz/100MHz, ou seja, com 200 MHz de banda de guarda. Os resultados encontrados demonstraram que a seletividade e proteção destes dispositivos são inferiores quando comparadas as do primeiro LNBF de nova geração testado.

O melhor LNBF suportou em média aproximadamente -28 dBm em sua entrada antes da degradação do sinal de TV no início da faixa, quando o sistema 5G operava com potência eirp na ordem de 67 dBm por polarização, e níveis de aproximadamente -18 dBm para canais acima de 3,86 GHz, quando o sistema 5G operava com potência eirp na ordem de 78 dBm por polarização. Este desempenho foi muito superior aos demais LNBFs, na ordem de 10 dB no limiar de interferência para a faixa inicial do TVRO e até mais nas frequências acima de 3,86 GHz.

De forma geral concluiu-se que este LNBF por si só seria suficiente para mitigação da maioria das situações de interferência entre os sistemas, porém outras ações são sugeridas no relatório, como por exemplo aumentar a banda de guarda entre os sistemas, utilização de menor nível de potência na direção da TVRO, entre outras, ressalvando-se que ainda podem existir situações extremas em que este dispositivo pode não ser capaz de eliminar uma situação de interferência.

3.1.5 RELATÓRIO DOS TESTES DE CONVIVÊNCIA ENTRE O IMT-2020 OPERANDO NA FAIXA DE 3,5 GHZ E ESTAÇÕES TERRENAS PROFISSIONAIS OPERANDO EM FAIXA ADJACENTE (DEZEMBRO DE 2020)

Neste estudo, complementar ao anterior (item 3.1.4), apresentado em dezembro de 2020, e também realizado pela Anatel com a participação de colaboradores e observadores externos (empresas das indústrias de radiodifusão, satélite e móvel), foi avaliada a convivência entre sistemas IMT operando na faixa de 3,5 GHz, utilizando tecnologia IMT-2020 (5G *New Radio Non-Standalone* TDD), com canalização na faixa de frequências entre 3,4 e 3,7 GHz, utilizando até três portadoras com largura de faixa de 100 MHz, e o Serviço Fixo por Satélite para uso profissional, sistemas de recepção de satélite TVRO, com LNBFs com filtros de mercado operando em 3,7 GHz a 4,2 GHz (Figura 3.6 do item anterior) considerando situações críticas, interferências e possíveis medidas de mitigação.

Adicionalmente foram avaliadas emissões dos transmissores 5GNR (gNodeBs) considerando suas especificações e emissões fora de faixa, nas faixas de IMT 3,4 - 3,6 GHz

(emissões fora de faixa em 3,6 - 3,7 GHz) e 3,4 - 3,7 GHz (emissões fora de faixa em 3,7 - 3,8 GHz).

Os testes de campo foram realizados novamente no Centro de Referência Tecnológica da Claro (CRT), em ecossistemas 5G (IMT-2020) em ambiente externo (*outdoor*), com antenas instaladas em alturas de 10,6 m e 11 m (Huawei), 12 m (Nokia) e 14 m (Ericsson), na faixa de 3,5 GHz.

Neste teste a antena de recepção de TVRO utilizada possuía com diâmetro de 2,4 m, a uma distância de aproximadamente 65 m dos sistemas móveis. Foram testados 4 LNBS monopontos, sendo 2 com filtro integrado na faixa 3,7 GHz a 4,2 GHz, e 1 com filtro integrado na faixa de 3,8 GHz a 4,2 GHz.

A configuração dos testes, que contou com receptores digitais, avaliou 5 canais de recepção de satélite (modulação 8-PSK), e os sistemas 5G foram configurados especificamente para maximizar as interferências, com antenas de conformação de feixe configuradas na direção do sistema interferido, com nível de 100% de tráfego no sentido *downlink*.

Buscou-se verificar o limiar de visibilidade através da imagem de vídeo em um monitor de TV, estabelecendo um padrão visual subjetivo (*threshold of visibility*) que permitisse identificar objetos na imagem (bloqueios ou macro blocos), e a recepção sem interferência por dois minutos (ou cinco quando necessário). Outras características técnicas úteis foram avaliadas, medidas e registradas nos procedimentos de testes adotados.

Nos testes de campo procurou-se observar a saturação do LNB e as interferências causadas por emissões fora de faixa (OOBE) do sistema IMT (3,4 - 3,7 GHz), considerando diversas portadoras de 60, 80 e 100 MHz, e com a faixa de corte dos LNBFs a partir de 3,7 GHz e 3,754 GHz.

Foi demonstrado que podem ser utilizadas diversas bandas de guarda em função dos valores suportados pelos dispositivos profissionais disponíveis no mercado, sendo notado que o sinal transmitido em faixa adjacente ao FSS é o principal ofensor do sistema interferido. O filtro para a proteção do FSS pode necessitar de uma customização da seletividade em função da faixa de frequência utilizada pelo IMT-2020.

3.2 CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-*ADVANCED* E TVRO NA FAIXA DE 3,5 GHZ (2017)

Este estudo [47], que foi utilizado como base inicial para o trabalho aqui apresentado, foi publicado em junho de 2017, e analisa condições de coexistência e define restrições de operação para sistemas IMT-*Advanced* (sistemas móveis de 4ª Geração - 4G - Recomendação ITU-R M.2012-4) [18] na faixa de 3400-3600 MHz, de forma a garantir a operação satisfatória, sem interferência prejudicial, dos LNBFs dos sistemas de TVRO do FSS na faixa de 3625-4200 MHz utilizados no Brasil, empregando o método estatístico de Monte Carlo no software de simulação Seamcat.

As características dos sistemas IMT utilizadas constam do Relatório ITU-R M.2292-0 [50], sendo simulados cenários de macrocélula urbano (Uma, do inglês *Urban Macrocell*), pequenas células externas urbano (Outdoor USm, do inglês *Outdoor Urban Small Cell*) e macrocélula suburbano (SMa, do inglês *Suburban Macrocell*), com alguns parâmetros seguindo padrões do 3GPP. Foram consideradas duas portadoras de 20 MHz com máxima potência, de forma a simular uma transmissão com largura de banda de 40 MHz.

As características dos sistemas de TVRO seguem a Recomendação ITU-R S.465-6 [54] e a utilização típica das antenas usadas nas regiões Norte e Sul do Brasil, trazendo a maior similaridade possível com as condições reais destes sistemas no país.

Os parâmetros de propagação utilizados consideraram a Recomendação ITU-R P.452-16 [39], espaço livre (FSPL, do inglês *Free-space path loss*) e modelagens intermediária e/ou específicas, conforme o caso, de modo a trazer uma maior precisão aos resultados.

As diversas configurações possíveis para os sistemas de transmissão e recepção resultaram em 48 cenários diferentes simulados.

O objetivo foi verificar saturação do LNBF, sendo que a antena de recepção de TVRO, com diâmetro de 1,5 m, foi colocada aleatoriamente dentro da célula LTE, localizada em uma rede de 7 células, com uma distância mínima da estação base de 10 metros, conforme a Figura 3.8.

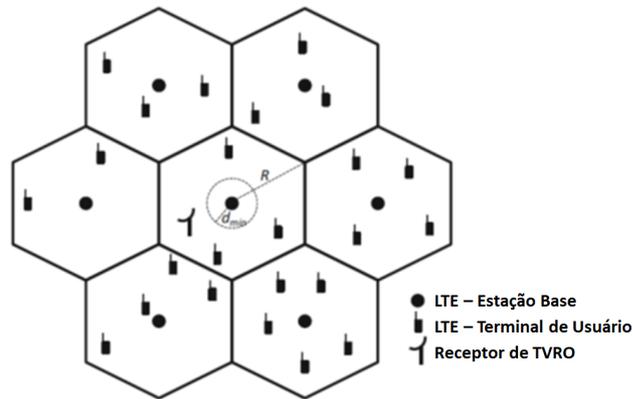


Figura 3. 8 – Posição relativa entre o receptor de TVRO e a rede de 7 células de LTE simulada no estudo

A análise levou em conta características de produtos vendidos no Brasil, tendo por referência os valores limites de saturação dos LNBFs de -60 dBm e -45 dBm, e foi considerada aceitável a interferência em um percentual de 5% de sistemas de TVRO.

Conclusões

Os resultados indicaram que um LNBF com nível de saturação de -60 dBm, do tipo mais comum e utilizado no Brasil, não suporta interferências sem um filtro de Banda C embutido.

Por outro lado, a coexistência é possível em pequenas células urbanas, ou para algumas configurações de macrocélulas urbanas ou suburbanas, se forem utilizados equipamentos de recepção mais robustos, aliados a um LNBF com nível de saturação de -45 dBm por exemplo.

Usando um filtro de banda C adequado, com no mínimo 30 dB de rejeição, a coexistência é possível em todos os cenários.

Dependendo das características do filtro de Banda C, a banda de guarda de 25 MHz entre os sistemas IMT e TVRO pode não possibilitar a utilização de equipamentos de baixo custo, o que pode dificultar esta solução no mercado, sendo necessárias soluções mistas como por exemplo um filtro de médio porte aliado a um LNB robusto, uma antena de melhor qualidade e redução da potência da estação base, entre outras soluções possíveis.

Em resumo, o estudo demonstrou que há saturação dos LNBF dos receptores de TVRO devido a baixa capacidade de filtragem destes sistemas, o que ocorre principalmente devido à interferência da Estação Base (BS, do inglês *Base Station*), ou seja, no enlace de descida do

sistema IMT (*downlink*), mas que, de forma geral, o uso de um receptor melhor e otimizado (LNBF), com distância de separação adequada entre os sistemas, pode mitigar significativamente as interferências prejudiciais e permitir a coexistência entre sistemas conforme especificado nas simulações.

Conforme citado anteriormente, este estudo foi utilizado como base inicial para o trabalho aqui apresentado, e seus resultados, que demonstraram que a saturação dos receptores de TVRO ocorre principalmente devido aos sinais das estações base, serviram como orientação para que nesta dissertação fossem realizadas simulações apenas do enlace de descida do sistema IMT-2020.

3.3 RELATÓRIOS DA UIT: ITU-R M.2109 (2007) E ITU-R S.2368-0 (2015) - ESTUDOS DE COMPARTILHAMENTO ENTRE SISTEMAS IMT-*ADVANCED* E REDES DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS NO FSS NAS FAIXAS DE 3400 – 4200 MHZ E 4500 – 4800 MHZ

O Relatório ITU-R M.2109 [37] foi produzido no âmbito dos estudos realizados para os trabalhos do item de agenda 1.4 da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2007 (WRC-07), conforme a Resolução 228 (Rev.WRC-03) [55].

O Relatório ITU-R S.2368-0 (2015) [48], que informa em sua introdução ser suplementar ao relatório ITU-R M.2109, foi produzido no âmbito dos estudos realizados para os trabalhos do item de agenda 1.1 da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2015 (WRC-15), conforme a Resolução 233 (WRC-12) [56].

Ambos documentos trazem resumos de estudos de compartilhamento entre sistemas IMT-*Advanced* e redes geoestacionárias de satélite no serviço fixo por satélite (FSS) nas faixas de 3400 – 4200 MHz e 4500 – 4800 MHz, contendo diversas informações que cobrem aspectos regulamentares e técnicos, incluindo análise de possíveis interferências de transmissores IMT-*Advanced* em estações terrenas receptoras do FSS operando nas mesmas faixas, em faixas adjacentes (incluindo saturação destes receptores), estudo de medição sobre a interferência do transmissor IMT-*Advanced* em estação terrena de recepção de televisão (TVRO), técnicas de mitigação e técnicas de gerenciamento de espectro para melhorar as possibilidades de compartilhamento.

Os relatórios cobrem um total de 22 estudos e trazem conclusões semelhantes quando se trata de aspectos amplos, como por exemplo a de que distâncias de separação entre as estações IMT-*Advanced* e FSS são necessárias para garantir a proteção das estações terrenas de recepção do FSS, que podem ser delimitadas dependendo dos parâmetros das redes e da implantação dos dois serviços, ou seja, conforme as especificidades de cada caso de uso.

Outras conclusões são resumidas a seguir:

- a) Quando os sistemas utilizam as mesmas faixas de operação (sistemas em operação co-canal), as distâncias podem variar de dezenas a mais de cem quilômetros, conforme o critério de interferência aplicado, sendo que esta conclusão se aplica para cenários de sistemas IMT-*Advanced* em macrocélulas urbanas/suburbanas, e pequenas células internas e externas (*indoor/outdoor small-cells*);

- b) No caso em que os sistemas estavam em faixas adjacentes, os resultados indicaram que as distâncias mínimas que possibilitam a convivência sem interferência aos sistemas de recepção do FSS diminuem, e para cenários de macrocélulas variaram em torno de 5 a 30 km e de pequenas células internas (*indoor small-cells*) entre 900 metros a 5 km. Neste caso de uso em faixas adjacentes, os resultados apresentados demonstraram que utilizando bandas de guarda maiores entre os sistemas, as distâncias requeridas entre eles, para a proteção da recepção dos sistemas FSS, diminui;
- c) A respeito da possível saturação ou resposta não linear do receptor do FSS (LNA/LNB), demonstrou-se a necessidade de haver também uma distância entre os sistemas, que no caso de macrocélulas variam em torno de 2 a 9 km e de pequenas células entre 100 a 900 metros.

Por considerarem parâmetros internacionalmente aceitos nos estudos que fundamentam as decisões das Conferências Mundiais de Radiocomunicações, são referências importantes para decisões já estabelecidas no âmbito do Regulamento de Radio da UIT no que diz respeito as identificações de faixas para sistemas IMT, no caso na Banda C, que é o tema aqui apresentado.

Estes relatórios da UIT foram utilizados como referências, em maior ou menor grau, nos estudos que são apresentados neste item 3 desta dissertação, e certamente continuarão sendo parâmetro para estudos futuros no que se referem ao compartilhamento entre os sistemas IMT e FSS nas faixas de 3400 – 4200 MHz e 4500 – 4800 MHz.

3.4 CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS IMT-*ADVANCED* E SISTEMAS FIXOS POR SATÉLITE NA FAIXA DE 3,5 GHz NA COLÔMBIA (2020)

Este estudo apresenta simulações de coexistência co-canal entre sistemas IMT-*Advanced* e FSS na faixa de 3,5 GHz em cenário realista da cidade de Bogotá, Colômbia [49].

Embora a convivência co-canal entre estes sistemas não seja o objetivo desta dissertação, foi analisado pelo ponto de vista de se demonstrar um trabalho que, apesar de ter método e objeto diferente, considera os mesmos sistemas, faixas em estudo e parâmetros internacionais para as simulações, podendo ser aproveitado futuramente caso seja necessário.

O artigo apresenta um estudo de coexistência entre sistemas IMT-*Advanced* (portadoras de 20 MHz) e FSS, ambos na faixa de 3500 - 3700 MHz na Colômbia, considerando o atual uso da faixa por sistemas FSS no país e sua possível utilização para os serviços móveis, utilizando o software ICS Telecom para avaliar a interferência prejudicial e o nível de degradação do sinal recebido pela estação FSS.

Simulações foram feitas em cenários realistas na cidade de Bogotá, Colômbia, tomando por base a Recomendação ITU-R M.2012-4 [18], e os Relatórios ITU-R M.2292-0 [50] e ITU-R M.2109 [37], dentre outros.

Os cenários considerados incluem interferências entre a estação base do IMT e a estação terrena do FSS (1), equipamento do usuário IMT e estação terrena do FSS (2), estação de satélite do FSS e estação base do IMT (3), e estação do satélite e equipamento do usuário IMT (4), conforme demonstra a Figura 3.9.

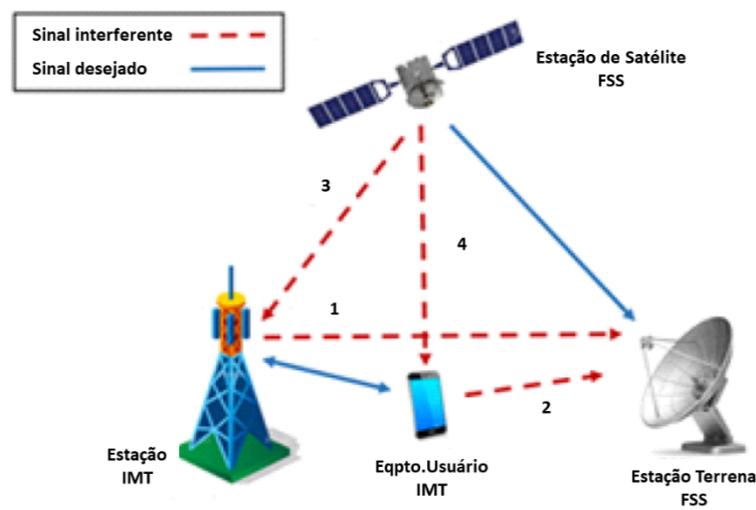


Figura 3. 9 – Cenários das simulações

Foram apresentados resultados de simulações em modos de transmissão TDD no sistema IMT, locações externas (*outdoor*), cenários urbanos e suburbanos, seguindo a Recomendação ITU-R M.2292-0 [50].

Conclusões

Os resultados das simulações co-canal demonstram que as situações críticas de interferências são ocasionadas pelos sinais provenientes da estação base e dos equipamentos de usuário do IMT na estação de recepção terrena do FSS.

Conclui que a distância de proteção necessária entre os sistemas é dependente do ângulo de chegada do sinal de interferência e da banda de guarda utilizada, sendo que esta distância é maior que 250 km para uma interferência co-canal em um cenário suburbano de pior caso, podendo ser reduzida para 17,5 km se uma banda de guarda de 25 MHz for implementada e a diferença angular do sinal IMT for de 42°.

Adicionalmente, os resultados mostram que a distância de proteção para o equipamento de usuário é da ordem de 100 vezes menor que a da estação base.

Em resumo, de acordo com as simulações realizadas, a coexistência entre os sistemas só é possível quando existe uma distância de proteção adequada entre a estação base do IMT e a estação terrena do FSS, que deve ser determinada conforme a banda de guarda existente entre os sistemas.

3.5 ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA, INTERFERÊNCIA E COMPARTILHAMENTO ENTRE IMT-2020 E FSS EM ONDAS MILIMÉTRICAS (2016-2019)

Apresenta-se resumidamente os resultados de estudos em ondas milimétricas realizados pelo Brasil, apresentados na UIT-R pela delegação brasileira chefiada pela Anatel, todos utilizando os parâmetros internacionais da UIT-R para IMT-2020.

Embora as ondas milimétricas não sejam o tema do trabalho aqui apresentado, a citação destes estudos tem por objetivo demonstrar a relevância do simulador SHARC, utilizado em todos os três estudos, ratificando sua importância e validando sua utilização neste trabalho.

Adicionalmente, considerando que os estudos exploram a utilização de parâmetros e características do IMT-2020, serviram também como base para o desenvolvimento deste trabalho.

Os dois primeiros trabalhos (itens 3.5.1 e 3.5.2) foram desenvolvidos no âmbito dos trabalhos da Anatel para o ciclo de estudos de 2016-2019 da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2019, resultando em documentos técnicos apresentados pelo Brasil na UIT-R no grupo responsável pelos trabalhos relativos ao IMT-2020, Grupo de Tarefas 5/1(TG 5/1, do inglês *Task Group 5/1*). O terceiro estudo foi apresentado em dissertação de mestrado apresentada na Universidade de Brasília (UnB) em maio de 2019.

Todos estes trabalhos e estudos serviram como orientação para as discussões e decisões do Brasil nos temas de atribuição das faixas em ondas milimétricas na WRC-19.

3.5.1 CONVIVÊNCIA ENTRE IMT-2020 E FSS NA FAIXA DE 24,25 - 27,5 GHz

Este estudo foi apresentado pelo Brasil na UIT-R no ano de 2017, no grupo responsável pelos trabalhos relativos ao IMT-2020, Grupo de Tarefas 5/1(TG 5/1, do inglês *Task Group 5/1*) [57], sendo incorporado ao seu relatório final [58].

A faixa de 27 - 27,5 GHz, extensivamente utilizada por sistemas do Serviço Fixo por Satélites, na chamada Banda Ka (17,7 - 20,2 GHz, *downlink*, e 27 - 30 GHz, *uplink*), é atualmente explorada, entre outras finalidades, para prover banda larga para usuários em localidades menos assistidas pelas grandes operadoras, sendo utilizada de forma expressiva pelo Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC), satélite brasileiro lançado em maio de 2017.

O estudo indicou que os critérios de proteção da estação FSS são atendidos para a rede modelada com uma grande margem de segurança ao usar os parâmetros de implantação IMT propostos, ou seja, é possível a coexistência entre Sistemas IMT e FSS na faixa considerada.

3.5.2 CONVIVÊNCIA ENTRE IMT-2020 E FSS NAS FAIXAS DE 37 - 42,5 GHZ E 42,5 - 43,5 GHZ

Estes estudos de convivência entre IMT-2020 (5G) e FSS nas faixas de 37 - 42,5 GHz e 42,5 - 43,5 GHz também foram apresentados pelo Brasil na UIT-R, em 2017 e 2018, no TG 5/1 [59] [60] [61] [62] [63] e incorporados ao seu relatório final [58].

As faixas de 37 - 42,5 GHz e 42,5 - 43,5 GHz, também utilizadas pelos Sistemas do Serviço Fixo por Satélites, no sentido espaço para Terra (e-T) e sentido Terra para espaço (T-e), respectivamente, que fazem parte da chamada Banda Q, são consideradas uma ótima possibilidade para a harmonização internacional, devido a sua pouca ocupação, o que permite uma faixa mais extensa de espectro para os sistemas IMT-2020 e suas evoluções futuras.

Considerando que no Brasil a Banda Q é considerada para utilização futura pelo Governo, a Anatel liderou estudos para examinar a possibilidade de interferências do IMT-2020 nas estações terrestres do FSS na faixa de 37 - 42,5 GHz e nas estações satelitais na faixa de 42,5 - 43,5 GHz, levando em conta a interferência agregada total como o principal indicador de desempenho para estes estudos de coexistência.

Na faixa de 37 – 42,5 GHz, a interferência é mantida dentro dos critérios de proteção se uma distância de 1000 m for mantida entre o sistema FSS (e-T) e o centro do sistema IMT, ou, de forma equivalente, 210 m entre o FSS (e-T) e a borda do cluster IMT.

Na faixa de 42,5 - 43,5 GHz, a interferência encontrada foi inferior ao critério de proteção de -12,2 dB em todas as etapas de simulação

3.5.3 ESTUDO DE INTERFERÊNCIA E COMPARTILHAMENTO DE FREQUÊNCIAS ENTRE IMT-2020 E FSS NAS FAIXAS DE 24,25-27,5 GHZ, 37-42,5 GHZ E 42,5-43,5 GHZ

Na dissertação de mestrado “Comunicações IMT-2020: Interferência e compartilhamento de frequência em ondas milimétricas” (C.B.Queiroz) [64] foram

apresentados de maneira mais aprofundada outros estudos de compartilhamento entre IMT e FSS na faixa de 24,25 - 27,5 GHz, e nas faixas de 37 - 42,5 GHz e 42,5 - 43,5 GHz, que também utilizaram o simulador SHARC e também serviram como base inicial e de consulta para o desenvolvimento deste trabalho, retornando resultados semelhantes aos relatados nos dois estudos que tratam de ondas milimétricas anteriormente apresentados.

4 MODELAGEM E RESULTADOS

Este capítulo inicia com uma breve apresentação do software de simulação utilizado, seguida da modelagem e metodologia utilizadas, respectivos parâmetros dos sistemas simulados, e critérios estabelecidos, de forma a explicar de que forma os estudos foram conduzidos e realizados. Por fim são demonstrados os resultados encontrados e realizada a análise e interpretação destes dados.

4.1 SIMULADOR SHARC

Conforme já citado nesta dissertação, a Recomendação ITU-R M.2101-0 [45] definiu uma metodologia para realizar estudos de compatibilidade e compartilhamento de redes móveis de 4ª Geração em diante, para estimar a interferência causada pelos sistemas IMT-Advanced (4G) e IMT-2020 (5G) em outros sistemas de radiocomunicações que utilizem a mesma faixa de radiofrequências.

Utilizando a estrutura proposta nesta recomendação, a Gerência de Espectro, Órbita e radiodifusão da ANATEL desenvolveu, em colaboração com a Universidade de Brasília (UnB), o simulador SHARC (*SHARing and Compatibility*) [15], ferramenta colaborativa de fonte aberta e que se referencia no método de Monte Carlo para calcular a interferência entre os sistemas.

O método de Monte Carlo consiste em um método estatístico para obtenção de dados numéricos por meio de amostragens aleatórias, ou seja, através da repetição sucessiva de inúmeras simulações chega-se a um resultado probabilístico numérico.

Reconhecido amplamente pela comunidade acadêmica, é utilizado em nível mundial nos campos da engenharia, biologia, física, matemática, dentre outras áreas, sendo utilizado na resolução de problemas através da geração de uma enorme sequência de números aleatórios que seguem uma determinada distribuição estatística, que representa um processo estocástico real. Em resumo, os números aleatórios gerados são recuperados e transformados em informações estatísticas que são interpretadas em resultados. Uma abordagem aprofundada de sua utilização em estudos de análise de interferências é apresentada em [65].

O SHARC implementa o modelo de simulação descrito na Recomendação ITU-R M.2101-0, e utiliza funções estatísticas, caracterizando cada elemento da rede bem como o

canal de propagação. O simulador trabalha com um sistema vítima, que no caso deste estudo é a TVRO, e um sistema interferente, o IMT-2020.

O simulador foi apresentado pelo Brasil no Grupo de Trabalho 5D (WP 5D, do inglês *Working Party 5D*) da UIT-R, responsável pelos estudos de sistemas IMT, em reunião realizada em Munique, de 03 a 11 /10/2017 [66]. Após aprovação do grupo nesta reunião, o documento apresentado foi disponibilizado no site do grupo, na página da UIT [67], de forma a permitir a acessibilidade de todos os interessados em utilizar a ferramenta, uma vez que se trata de software aberto e que pode ser utilizado por aqueles que se interessarem.

Tal fato demonstra transparência em relação ao código e aos parâmetros utilizados para a construção do software, uma vez que pode ser auditado e utilizado por quem desejar na comunidade internacional.

Adicionalmente o SHARC foi extensivamente utilizado em diversos estudos de compatibilidade e compartilhamento já apresentados em nível nacional e internacional, entre eles os citados no item 3.5 desta dissertação.

4.2 MODELAGEM E METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO

Com o objetivo de realizar os estudos de simulação apresentados, o SHARC foi utilizado de forma a realizar 5 mil iterações, onde cada iteração de simulação se inicia com a distribuição de estações IMT e TVRO; a seguir é inserido um fator de carga na rede, que define o percentual médio das estações IMT ativas transmitindo ao mesmo tempo. Os terminais de usuários (UE) são alocados e conectados às suas Estações Bases (BS), e então efetuam-se os cálculos de interferência e os resultados são coletados.

Este processo é repetido nas diversas iterações, de forma que uma distribuição estatística dos resultados possa ser levantada. Na Figura 4.1 é demonstrado o diagrama utilizado no estudo.

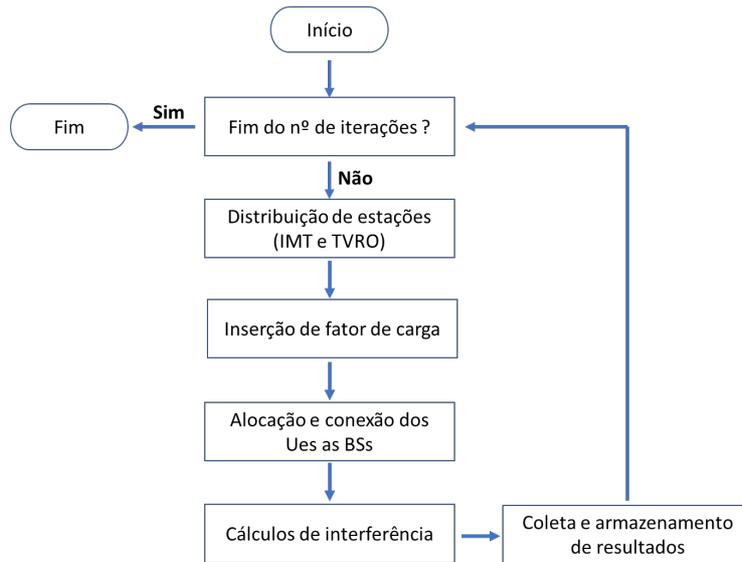


Figura 4. 1 - Diagrama de simulação

Neste trabalho, foram simuladas redes IMT com antenas setoriais e com conformação de feixe, ambas podendo ser empregadas em sistemas IMT-2020. Tendo em vista que a saturação dos receptores de TVRO ocorre principalmente devido aos sinais das estações base [47], realizaram-se apenas simulações do enlace de descida do sistema IMT.

A Figura 4.2 apresenta a topologia utilizada, de uma rede com 19 sites, com 3 setores cada, onde foram distribuídos aleatoriamente 3 terminais de usuários (UE) por setor, conforme a Recomendação ITU-R M.2101-0.

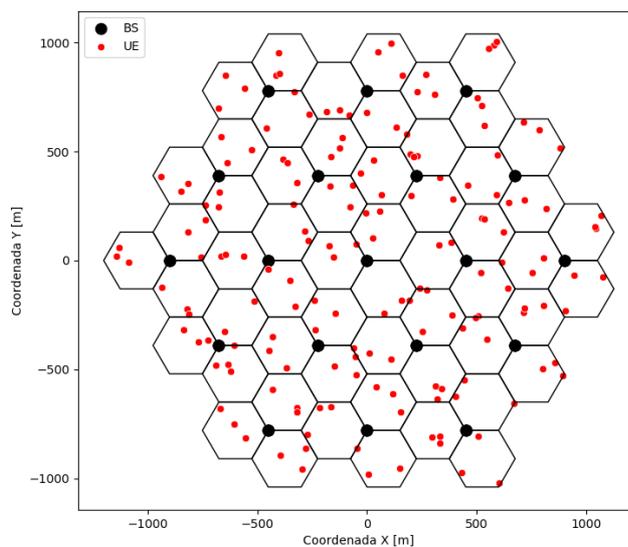


Figura 4. 2 - Cluster de 19 sites com 3 setores cada (Rec.ITU-R M.2101-0)

Foram realizadas três simulações com cada um dos tipos de antena avaliados, nas quais a antena de TVRO foi posicionada a distâncias de 50, 100 e 200 metros a oeste da BS central. Adicionalmente, a estação de TVRO também foi posicionada na interseção entre dois setores adjacentes com relação à rede IMT, conforme mostrado na Figura 4.3.

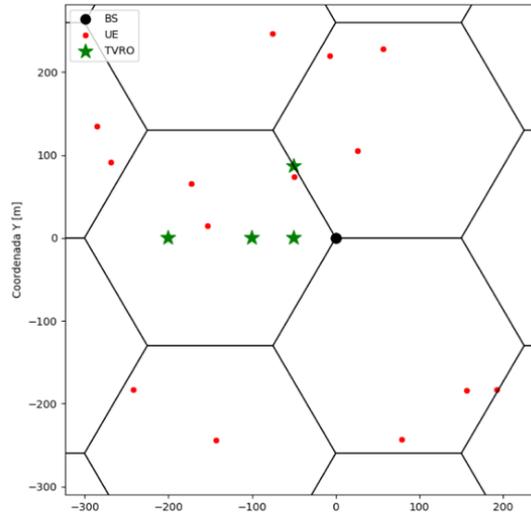


Figura 4. 3 - Posições da estação TVRO, BS e UE

Com o objetivo de examinar a sensibilidade do sistema de TVRO em relação a interferências do sistema IMT, foi avaliado se a potência agregada dos sinais IMT é maior ou igual a um limite de saturação (Oth) do receptor TVRO.

Considera-se que um receptor TVRO recebe interferência prejudicial se esta interferência for maior que seu limite de saturação, que neste trabalho é equivalente ao ponto de compressão de 1 dB (na entrada). No Brasil valores comerciais para este limite variam tipicamente de -60 dBm a -45 dBm, e já estão em desenvolvimento receptores de melhor qualidade, com limite da ordem de -30 dBm.

Desta forma os resultados contemplam também a comparação destes limites, resultando diretamente no percentual do tempo em que as estações TVRO são afetadas por interferência prejudicial do sistema IMT.

Foram realizadas 5 mil iterações em cada simulação realizada e considerados 3 dB de perda de polarização entre os sistemas.

4.3 MODELAGEM DO IMT-2020

A seguir são apresentados os parâmetros do sistema IMT-2020, Estações Bases (BS) e terminais de usuários (UE), e das antenas setoriais e com conformação de feixe.

4.3.1 PARÂMETROS DO SISTEMA IMT

Para o sistema IMT, considerou-se transmissão na faixa de frequências de 3500-3600 MHz, representando a faixa identificada a tecnologias IMT mais próxima da faixa de recepção dos sistemas TVRO. A faixa escolhida é especificada como parte da banda 78 pelo “*3rd Generation Partnership Project*” - 3GPP (Release 15) [68].

As características técnicas e operacionais do sistema IMT são mostradas nas Tabelas 4.1 e 4.2 , e foram definidas para uma área urbana tendo por base documentos da UIT-R com características dos sistemas *IMT-Advanced* e *IMT-2020* para estudos de convivência e análise de interferências, Relatório ITU-R M.2292-0 e documento de ligação com características dos sistemas *IMT-Advanced* e *IMT-2020* para estudos de compartilhamento na faixa de 3300-3400 MHz [69].

Tabela 4. 1 - Parâmetros da Estação Base (BS)

Parâmetro	Valor
Método de multiplexação	TDD
Faixa de operação	3500-3600 MHz
Raio da célula	300m
Altura da antena	20m
Setorização	3 setores
Tilt	10 graus
Reuso de frequência	1
Fator de carga da rede	50%
Figura de ruído	5 dB
Temperatura de ruído	290 k
E _{irp} máxima	68 dBm

Tabela 4. 2 - Parâmetros dos Terminais de Usuários (UE)

Parâmetro	Valor
Nº de terminais por site	3
Uso de Terminais "indoor"	70%
Potência máxima de saída	23 dBm
Figura de ruído	9 dB
Tipo de antena	Omnidirecional
Distribuição dos usuários nas células	Uniforme
Fator de carga na rede	50%

O fator de carga na rede define o percentual médio das estações IMT ativas transmitindo ao mesmo tempo. Assim, um valor de 50% significa que a probabilidade de uma estação estar ativa em determinado iteração da simulação é de 50%. Ainda assim, seguindo uma distribuição binomial, há a possibilidade de que todas as BSs estejam transmitindo.

4.3.2 PARÂMETROS DAS ANTENAS SETORIAIS UTILIZADAS NOS SISTEMAS IMT

Este estudo considera os padrões estabelecidos pela UIT-R para estudos de compartilhamento e compatibilidade eletromagnética e, como consequência, o padrão de modelo de antena setorial implementado segue a Recomendação ITU-R F.1336-5 [44].

A Recomendação ITU-R F.1336 foi inicialmente aprovada na UIT em 1997, passando por revisões nos anos de 2000, 2007, 2012, 2014, com sua derradeira revisão em 2019, e é uma referência mundial nos estudos de compartilhamento com serviços móveis sendo aceita pelos países signatários da organização, que a utilizam sempre que necessário em seus estudos. Desta forma, é empregada nos mais modernos estudos internacionais profissionais deste gênero, constituindo referência apropriada para os estudos aqui apresentados.

A recomendação, em seu anexo dedicado para estudos de compartilhamento nas faixas de 400 MHz a 6 GHz, admite que os elementos de antena são colocados em uma matriz na direção vertical e são direcionais setoriais na direção horizontal.

Com esta consideração, o ganho da antena setorial em um determinado ponto é expresso por:

$$G(\varphi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v) \quad (dB_i) \quad (1)$$

sendo:

G_0 : Ganho máximo no plano de azimute da antena (dBi)

$G_{hr}(x_h)$: Ganho relativo da antena no plano de azimute na direção normalizada $(x_h, 0)$ (dB)

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

φ_3 : largura de feixe de 3 dB no plano de azimute (em graus, geralmente estimada)

R : Taxa de compressão de ganho horizontal conforme o ângulo de azimute é deslocado

$G_{vr}(x_v)$: Ganho relativo da antena no plano de elevação na direção normalizada $(0, x_v)$ (dB)

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

θ_3 : largura de feixe de 3 dB no plano de elevação (em graus)

Na equação (1), φ e θ representam o ângulo da direção de azimute e elevação, respectivamente, no sistema de coordenadas de uma antena setorizada, conforme representação na Figura 4.4.

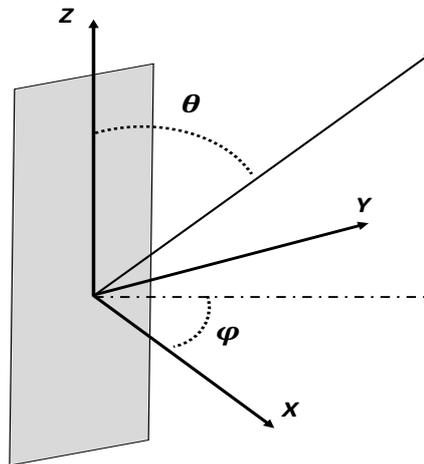


Figura 4. 4 - Sistema de coordenadas de uma antena setorizada

No caso específico do pico dos lóbulos laterais, os ganhos relativos G_{hr} e G_{vr} são dados conforme segue.

a) Plano de azimute φ (G_{hr}) :

$$\begin{aligned} G_{hr}(x_h) &= -12x_h^2 && \text{para } x_h \leq 0.5 \\ G_{hr}(x_h) &= -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{k_h} && \text{para } 0.5 < x_h \\ G_{hr}(x_h) &\geq G_{180} \end{aligned} \quad (2)$$

sendo:

$$x_h = |\varphi|/\varphi_3$$

k_h : fator de ajuste do padrão de azimute com base na potência vazada ($0 \leq k_h \leq 1$)

$$\lambda_{k_h} = 3(1 - 0.5^{-k_h})$$

$G_{180} = -12 + 10 \log(1 + 8k_p) - 15 \log\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)$, onde k_p é o parâmetro que realiza o ganho mínimo relativo para padrões de lóbulo lateral de pico

b) Plano de elevação (G_{vr}) :

$$\begin{aligned} G_{vr}(x_v) &= -12x_v^2 && \text{para } x_v \leq x_k \\ G_{vr}(x_v) &= -12 + 10 \log(x_v^{-1.5} + k_v) && \text{para } x_k \leq x_v < 4 \\ G_{vr}(x_v) &= -\lambda_{k_v} - C \log(x_v) && \text{para } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{vr}(x_v) &= G_{180} && \text{para } x_v \geq 90^\circ/\theta_3 \end{aligned} \quad (3)$$

sendo:

$$x_v = |\theta|/\theta_3$$

k_v : fator de ajuste do padrão de elevação com base na energia perdida ($0 \leq k_v \leq 1$)

$$x_k = \sqrt{1 - 0.36 k_v}$$

$$\lambda_{k_v} = 12 - C \log(4) - 10 \log(4^{-1.5} + k_v)$$

Na equação (3) a variável C é o fator de atenuação de inclinação, aplicado apenas para uma largura de feixe de 3 dB inferior a 20 graus no plano de elevação, que é dada por:

$$C = \frac{10 \log\left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{\theta_3}\right)^{1.5} \cdot (4^{-1.5} + k_v)}{1 + 8k_p}\right)}{\log\left(\frac{22.5^\circ}{\theta_3}\right)} ; \quad (4)$$

no qual k_p é o parâmetro que realiza o ganho mínimo relativo para o pico do lóbulo lateral.

Na Figura 4.5 pode ser observado o ganho de uma antena setorial, considerando a direção horizontal de 0° (graus), demonstrando sua diretividade e ganho conforme o ângulo.

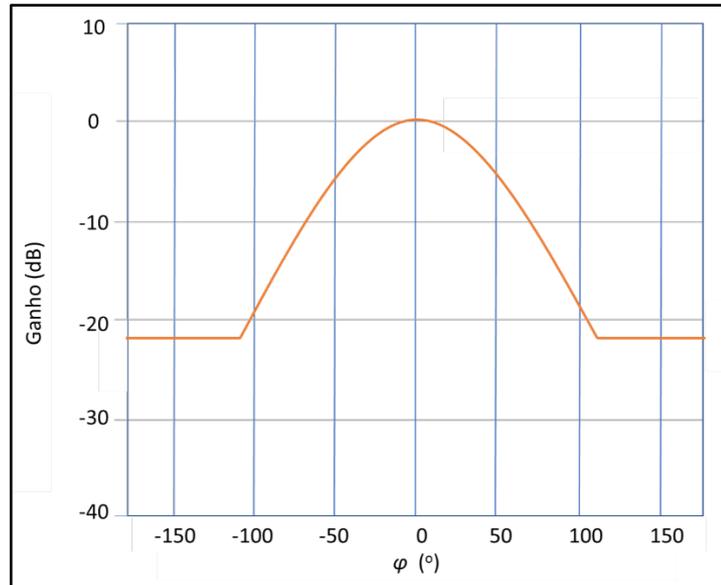


Figura 4. 5 - Diagrama de radiação horizontal da antena setorial

Os parâmetros das antenas setoriais utilizados nos sistemas IMT estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 - Parâmetros das antenas Setoriais

Parâmetro	Valor
Diagrama de radiação	ITU-R F.1336 [44]
Ganho máximo	18 dBi
Ângulo de 3 dB	65° horizontal/vertical conforme [44]
Perda em cabos e conectores	3 dB

4.3.3 PARÂMETROS DAS ANTENAS COM CONFORMAÇÃO DE FEIXE UTILIZADAS NOS SISTEMAS IMT

Seguindo na mesma linha dos padrões estabelecidos pela UIT-R, o padrão de modelo de antena com conformação de feixes implementado segue a Recomendação ITU-R M.2101-0 [45], que traz a metodologia de modelagem e simulação de redes IMT a ser utilizada nos estudos de compartilhamento e compatibilidade eletromagnética.

O modelo também é descrito detalhadamente nas normas 3GPP TR 37.842 [70] e 3GPP TR 37.840 (seção 5.4.41) [71].

Neste caso, o ganho de um elemento de antena é dado por:

$$A_E(\varphi, \theta) = G_{E,max} - \min(-[A_{E,H}(\varphi) + A_{E,V}(\theta)], A_m) \text{ (dB)}, \quad (5)$$

na qual $G_{E,max}$ é o ganho máximo do elemento de antena, $A_{E,H}(\varphi)$ é o ganho horizontal do elemento de antena, $A_{E,V}(\theta)$ é o ganho vertical do elemento de antena, e A_m a relação frente-costa horizontal do elemento de antena.

Na equação (5), φ e θ representam o ângulo da direção de azimute e elevação, respectivamente, no sistema de coordenadas do painel de antenas, conforme a Figura 4.6.

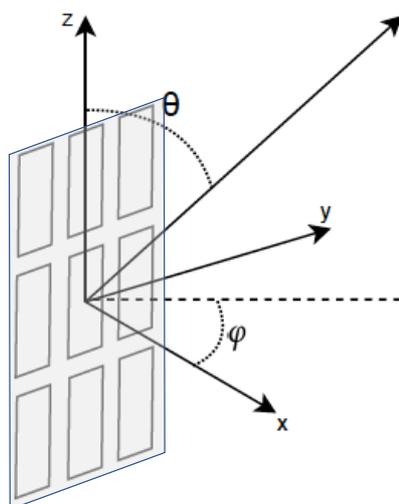


Figura 4. 6 - Sistema de coordenadas do painel de antenas

Os ganhos horizontal e vertical, em dB, são dados por:

$$A_{E,H}(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\Phi_{3dB}} \right)^2, A_m \right], \quad (6)$$

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta - 90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right], \quad (7)$$

na qual θ_{3dB} é o ângulo de abertura vertical de 3 dB do feixe e SLA_v é a atenuação vertical dos lóbulos laterais do elemento de antena.

Interpretando-se graficamente as equações (5), (6) e (7), os diagramas de radiação horizontal e vertical de um elemento de antena são demonstrados na Figura 4.7.

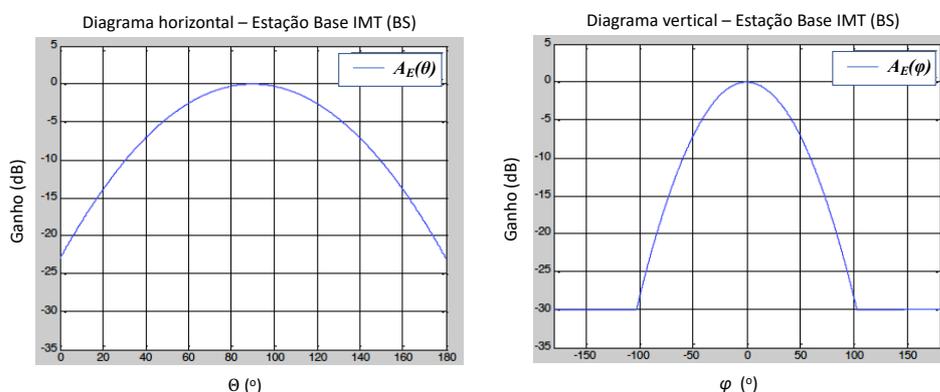


Figura 4. 7- Diagramas de radiação horizontal e vertical de um elemento de antena

O ganho do i -ésimo feixe composto criado pelo painel de antenas é o ganho resultante da soma logarítmica do ganho do painel de antenas com o ganho do elemento i , sendo representado por:

$$A_{A,Feixe\ i}(\varphi, \theta) = A_E(\varphi, \theta) + 10 \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} \varpi_{i,n,m} \cdot \upsilon_{n,m} \right|^2 \right) \quad (8)$$

na qual N_H e N_V são, respectivamente, os números de linhas e colunas da matriz do painel de antenas, $\varpi_{i,n,m}$ é denominado vetor de pesos e $v_{n,m}$ vetor de superposição, calculados por:

$$\varpi_{i,n,m} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left(\sqrt{-1} \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \sin(\theta_{i,feixe}) - (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \cos \theta_{i,feixe} \cdot \sin(\varphi_{i,feixe}) \right) \right) \quad (9)$$

$$v_{n,m} = \exp \left(\sqrt{-1} \cdot 2\pi \left((n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \cos(\theta) + (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \right) \right), \quad (10)$$

nas quais d_V e d_H são os espaçamentos vertical e horizontal entre os elementos da antenas, respectivamente, λ é o comprimento de onda da transmissão, e $\varphi_{i,feixe}$ e $\theta_{i,feixe}$ correspondem à direção de apontamento do i -ésimo feixe do painel, influenciando diretamente no diagrama de radiação do feixe no que se refere ao ganho e diretividade.

Na Figura 4.8 pode ser observado o ganho de uma antena com conformação de feixe, considerando a direção horizontal de 0° (graus), demonstrando a alta diretividade do feixe na direção desejada.

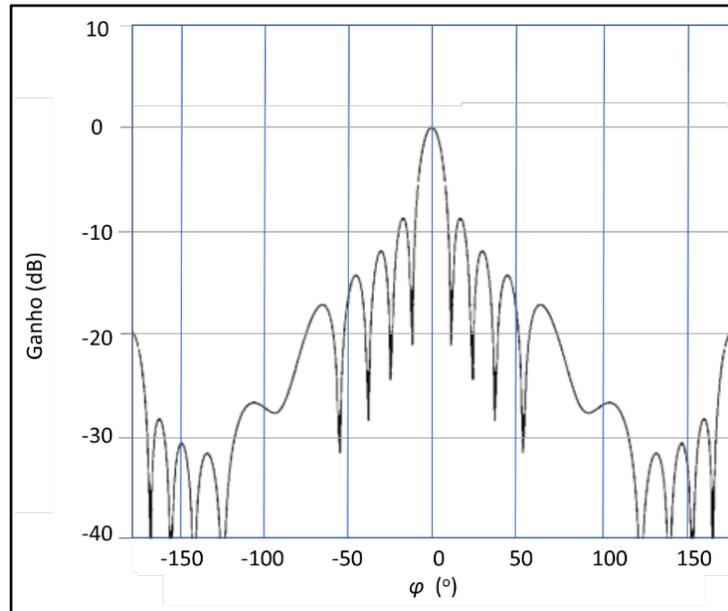


Figura 4. 8 - Diagrama de radiação horizontal da antena com conformação de feixe

Na Figura 4.9 pode ser observada a diferença de ganho entre antenas setoriais e com conformação de feixe, considerando o feixe na direção horizontal de 0° (zero graus), demonstrando a alta diretividade desta em relação à primeira.

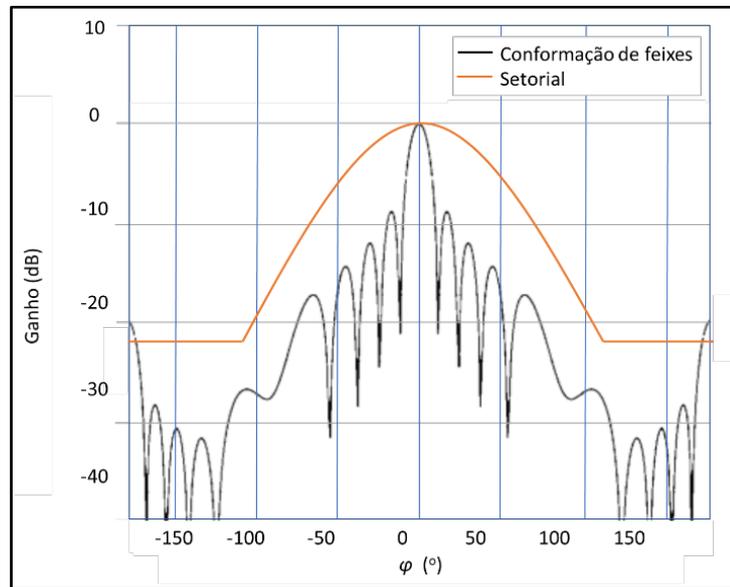


Figura 4. 9 - Diagramas de radiação horizontal das antenas setorial e com conformação de feixe sobrepostos

Na Figura 4.10 podem ser observadas as diferenças de ganho, em função do ângulo do feixe (0 , 30 e 60 graus), entre antenas setoriais e com conformação de feixe, onde pode ser observada novamente a alta diretividade desta em relação primeira.

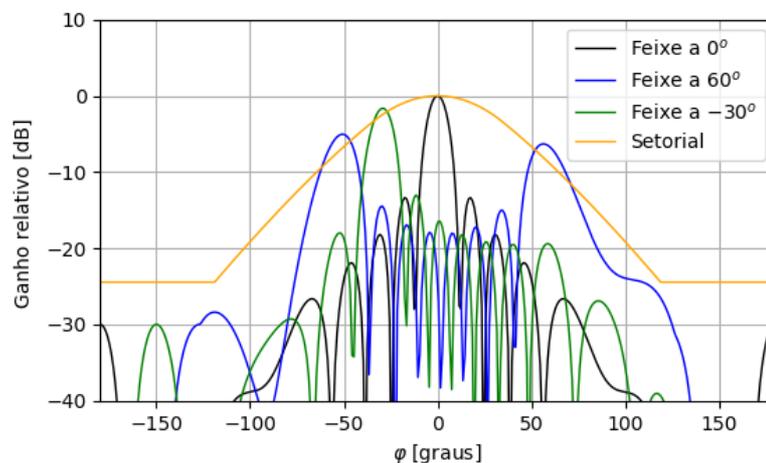


Figura 4. 10 - Diagramas de radiação horizontal da antena setorial e com conformação de feixe variando o feixe

Em [72] é demonstrado que a utilização de antenas com conformação de feixe permite ampliar a capacidade dos sistemas de telecomunicações pois aumenta a eficiência espectral e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas, alcançando menores níveis de interferência. Por isso, é considerada uma das principais técnicas para o aumento do desempenho dos sistemas IMT-Advanced e para o alcance das altas capacidades necessárias aos sistemas IMT-2020 [73].

Na Tabela 4.4 estão os parâmetros utilizados nas antenas com conformação de feixe conforme o documento do WP 5D da UIT-R que traz as características dos sistemas IMT-Advanced, IMT-2020 e de sistemas avançados de antenas (*Advanced antenna systems*) para estudos de convivência e análise de interferências [69].

Tabela 4. 4 - Parâmetros das antenas com conformação de feixe

Parâmetro	Valor
Número de elementos	8x8
Ganho máximo do elemento	8 dBi
Espaçamento vertical entre elementos	0,90 λ
Espaçamento horizontal entre elementos	0,60 λ
Ângulo de 3 dB	80° horizontal / 65° vertical
Relação frente-costa	30 dB
Perda ôhmica	2 dB

4.3.4 CÁLCULO DA EIRP

Para facilitar a comparação dos resultados das simulações das antenas, foi considerada mesma eirp máxima para as duas configurações. Isto foi garantido calculando-se a potência de transmissão (P_{Tx}) de cada sistema de antenas, utilizando-se as seguintes equações.

Equação para Antenas setoriais:

$$EIRP_{max} = P_{Tx(Set)} + G_{Set} - L_{\Omega(Set)} \quad (12)$$

Equação para Antenas com conformação de feixe

$$EIRP_{max} = P_{Tx(Beam)} + 10\log_{10}(N_{el}) + G_E + G_A - L_{\Omega(Beam)} \quad (13)$$

em que $P_{Tx(Set)}$ é a potência de transmissão entregue a antena da BS, $P_{Tx(Beam)}$ é a potência de saída de cada amplificador da antena com conformação de feixe, G_{Set} é o ganho da antena setorial, G_E é o ganho do elemento da antena, e L_{Ω} é a perda ôhmica. N_{el} é o número de elementos de antena do painel. G_A é o ganho do arranjo, que cresce conforme o número de elementos no arranjo.

Ressalta-se que a eirp calculada é a total do sistema de transmissão, e não é por feixe, ou seja, a eirp do sistema com antenas com conformação de feixe é a soma total da eirp de cada feixe transmitido.

Desta forma, conforme as equações (12) e (13), chegou-se aos valores de potência de transmissão utilizados nas simulações, de 26 dBm para as antenas com conformação de feixe, e 53 dBm para as setoriais, ambas resultando na eirp máxima de 68 dBm. Controle de potência não é utilizado e todas as estações IMT transmitem com potência máxima.

4.4 MODELAGEM DA TVRO

Na linha do estudo proposto, segue-se a Recomendação ITU-R S.465-6 [54], que fornece padrões de referência para estudos de coordenação e avaliação de interferência entre estações do serviço fixo por satélite (FSS) e estações de outros serviços na mesma faixa de frequências e em estudos de coordenação e avaliação de interferências entre sistemas no FSS.

Nota-se que não há sobreposição entre as faixas de frequência utilizadas pelos sistemas IMT e TVRO. Por isso, a interferência sofrida pela estação TVRO, operando na faixa 3625 – 4200 MHz, depende, principalmente, da capacidade que ela tem de filtrar a transmissão do sistema IMT, localizada na faixa 3500 – 3600 MHz.

A recomendação estabelece que, para estudos de convivência nas faixas de 2 a 31 GHz, o nível máximo de interferência causado à rede deve ser calculado com base nos seguintes valores de ganho da antena da estação terrena receptora:

$$\begin{aligned} G &= 32 - 25 \log \varphi \text{ (dBi)} && \text{for } \varphi_{min} \leq \varphi < 48^\circ \\ &= -10 \text{ (dBi)} && \text{for } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ; \end{aligned} \quad (14)$$

na qual φ é o ângulo (em graus) entre a direção considerada (do feixe do sinal que causa interferência) e à direção do feixe principal recebido pela antena, e φ_{min} pode ser no mínimo o valor de 1 grau (1°).

Os parâmetros dos sistemas de TVRO, que têm por base [47] e a Recomendação ITU-R S.465-6, são mostrados na Tabela 4.5

Tabela 4. 5 – Parâmetros da estação de TVRO

Parâmetro	Valor
Frequência de recepção	3628 MHz
Largura de faixa	6 MHz
Altura da antena	6m
Diâmetro da antena	1,5m
Elevação da antena	48° e 80°
Ganho máximo da antena	32 dBi
Limiar de saturação	-60/-45/-30 dBm
Elevação da antena	48° / 80°
Azimute	Apontando para oeste
Distância da BS central	50m/100m/200m
Diagrama de radiação	Recomendação ITU-R S.465-6

Considerou-se que a antena do receptor TVRO, instalada no topo das casas dos usuários, apresenta elevações de 48° e 80°, que correspondem aproximadamente a antenas instaladas em residências nas regiões sul e norte do Brasil, apontadas para o satélite “Star One C2”, que ocupa a posição orbital 70°W [74].

Adicionalmente, é importante esclarecer que o receptor é um dispositivo com o alimentador (*feeder*) e o LNB (*low-noise block*) integrados (LNBF), não sendo possível inserir um filtro externo entre eles. Assim, quando se trata neste trabalho de possível adição de filtro, quer-se dizer novo projeto de receptor inserindo um filtro em banda C em sua entrada. Destaca-se que um receptor com ponto de saturação X dB é equivalente a outro receptor com ponto de saturação X – Y dB (se não tivesse filtro), com um filtro adicionado no projeto de Y dB em sua entrada.

4.5 MODELO DE PROPAGAÇÃO

Conforme citado anteriormente, em [47] foi demonstrado que a saturação dos receptores de TVRO ocorre principalmente devido aos sinais das estações base (enlace de descida do sistema IMT-2020), não sendo relevantes os sinais provenientes dos terminais de usuários (UE) que chegam ao LNBF (enlace de subida).

Portanto, apesar de que o SHARC possibilita a implementação do modelo de propagação para micro células urbanas, permitindo a realização dos cálculos dos sinais

provenientes das UEs que chegam ao LNBF (enlace de subida), com implementação de controle de potência, avaliação de perda de caminho, ganho de antenas, e eirp total do sistema de antenas com conformação de feixe, tais cálculos não foram simulados.

Desta forma, a seguir, é descrito o modelo de propagação considerado para as simulações realizadas apenas para o enlace de descida (estação base).

O modelo de propagação adotado para a topologia macrocelular apresentada neste estudo (Figura 4.2), segue o modelo de [47] e da Recomendação ITU-R P.452-16 [39].

Dada uma distância “ d ”, em km, entre o transmissor e o receptor, se comunicando em uma faixa de radiofrequência “ f ”, em GHz, a perda de propagação no espaço livre “ P_{pel} ” (*free space path loss*) é dada por:

$$P_{pel} = 92,44 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d . \quad (15)$$

A perda adicional por obstruções (*clutter loss*) é dada por:

$$A_h = 10,25 \cdot F_{fc} \cdot e^{-d_k} \left(1 - \tanh \left(6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right) \right) - 0,33 \quad (\text{dB}) \quad (16)$$

na qual $F_{fc} = 0,25 + 0,375 (1 + \tanh(7,5 (f - 0,5)))$, d_k é a distância do ponto de obstrução (*clutter point*) à antena do receptor (km), h é a altura da antena do receptor (m) e h_a é a altura do ponto de obstrução (*clutter*) (m).

Desta forma a perda de propagação (P_{prop}) entre a estação base (BS) e o terminal de usuário (UE), e entre a BS e a antena do receptor TVRO, nos ambientes de macrocélula simulados neste estudo são representados por:

$$P_{prop} (\text{dB}) = \begin{cases} P_{pel} + X_{\sigma} , & d < 0,04 \\ P_{pel} + \frac{d - 0,04}{10d_k - 0,04} A_h + X_{\sigma} , & 0,04 \leq d < 10d_k \\ P_{pel} + A_h + X_{\sigma} , & d \geq 10d_k \end{cases} \quad (17)$$

na qual X_{σ} é uma variável aleatória gaussiana com média zero e desvio padrão σ , que modela o desvanecimento lento.

Ressalta-se que a Recomendação ITU-R P.452-16, que é normalmente utilizada nos estudos de compartilhamento, é válida para valores de d muito maiores que d_k , o que é seguido neste estudo.

Entretanto, para pequenas distâncias, o modelo de perda de propagação no espaço livre usualmente é suficiente para a simulação, com boa precisão, e, conforme explanado em [47], 40 m é considerada uma distância limite aceitável para estes modelos. Por este motivo, a Equação (17) considera este modelo para distâncias abaixo de 40 m.

No caso de distâncias entre 40m e $10 d_k$ a equação (17) descreve uma transição linear entre o modelo de perda de propagação no espaço livre e o da Recomendação ITU-R P.452-16.

4.6 CRITÉRIOS ESTABELECIDOS

Para simulações realizadas com o método Monte Carlo de um sistema com uma estação terrestre dentro de uma rede sincronizada, um resultado de P% de probabilidade de interferência pode ser interpretado de duas maneiras.

A primeira é como um valor de probabilidade de interferência nas localidades do cenário de simulação, caso a estação vítima tenha sua posição randomizada em cada iteração.

A segunda é como um valor de probabilidade de interferência no tempo, para uma estação vítima estacionária entre as iterações [75].

Neste trabalho, a segunda interpretação é utilizada, sendo que os resultados são expressos em probabilidade de interferência no tempo em cada posição da estação de recepção de TVRO.

O critério estabelecido para indicar interferências prejudiciais é o nível de saturação do LNBF, sendo que o valor de referência considerado é de -60 dBm, pois, conforme os estudos de convivência examinados no capítulo 3, a maioria dos dispositivos LNBF no mercado brasileiro não é capaz de funcionar adequadamente com um sinal interferente acima deste valor em sua entrada.

4.7 RESULTADOS E ANÁLISE

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 trazem os resultados gráficos das simulações para a estação de TVRO com elevação de 48°, situada a 50, 100 e 200 metros a Oeste da estação base (BS) conforme demonstrado anteriormente na Figura 4.3.

Os gráficos demonstram a porcentagem de tempo na qual o limiar de saturação é ultrapassado versus a atenuação que o filtro de recepção da estação TVRO é capaz de aplicar ao sinal interferente das estações IMT, ou seja, a rejeição do filtro do receptor TVRO (em dB).

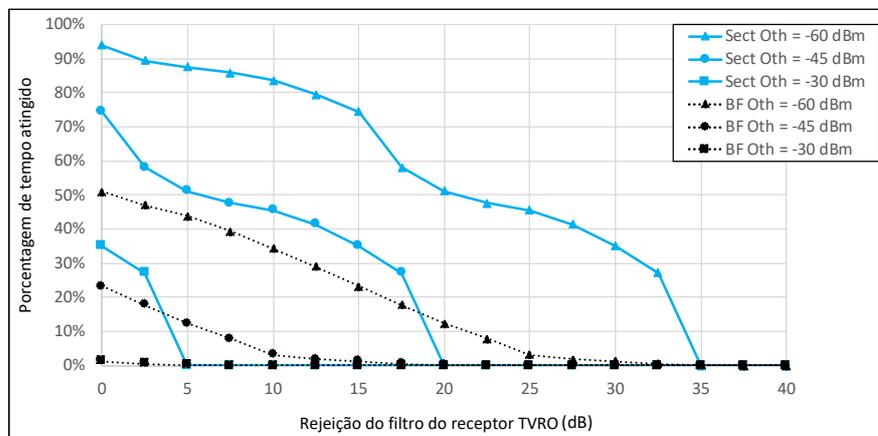


Figura 4. 11 - TVRO com elevação de 48° a 50m/Oeste da BS

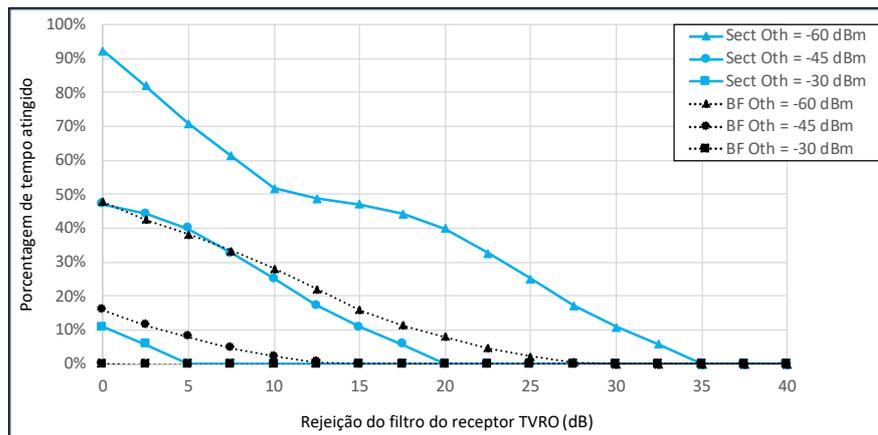


Figura 4. 12 - TVRO com elevação de 48° a 100m/Oeste da BS

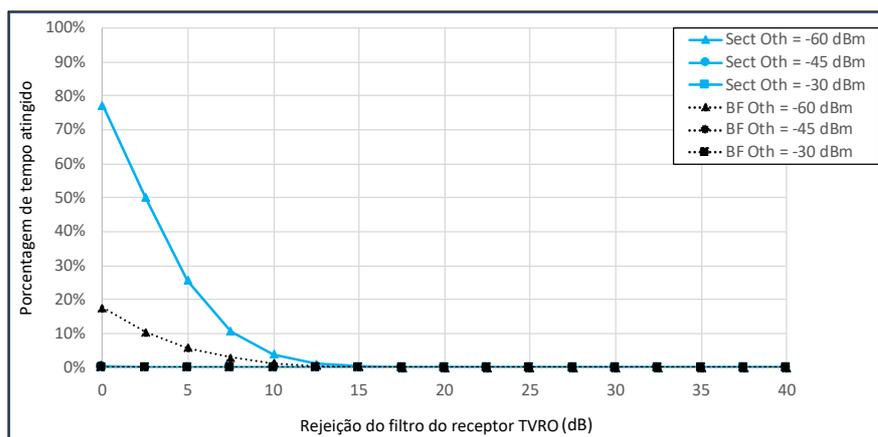


Figura 4.13 - TVRO com elevação de 48° a 200m/Oeste da BS

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 trazem os resultados gráficos das simulações para a estação de TVRO com elevação de 80°, situada a situada a 50, 100 e 200 metros a Oeste da estação base (BS), também conforme a Figura 4.3.

Da mesma forma, demonstram a porcentagem de tempo na qual o limiar de saturação é ultrapassado versus a atenuação que o filtro de recepção da estação TVRO é capaz de aplicar ao sinal interferente das estações IMT, ou seja, a rejeição do filtro do receptor TVRO.

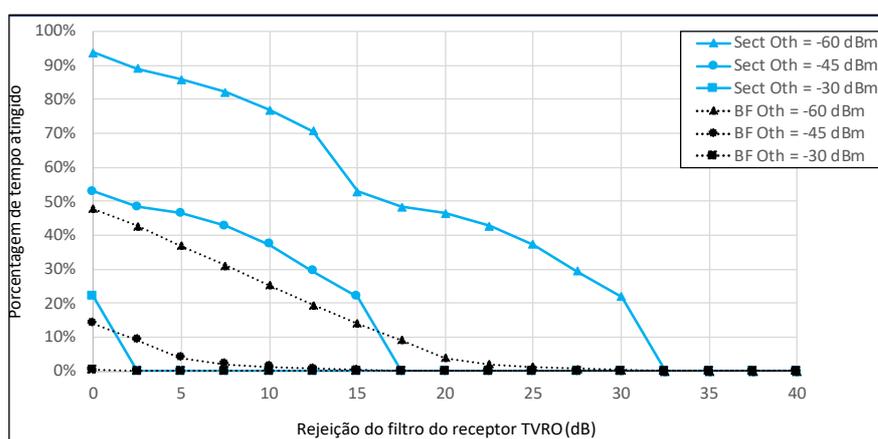


Figura 4.14 - TVRO com elevação de 80° a 50m/Oeste da BS

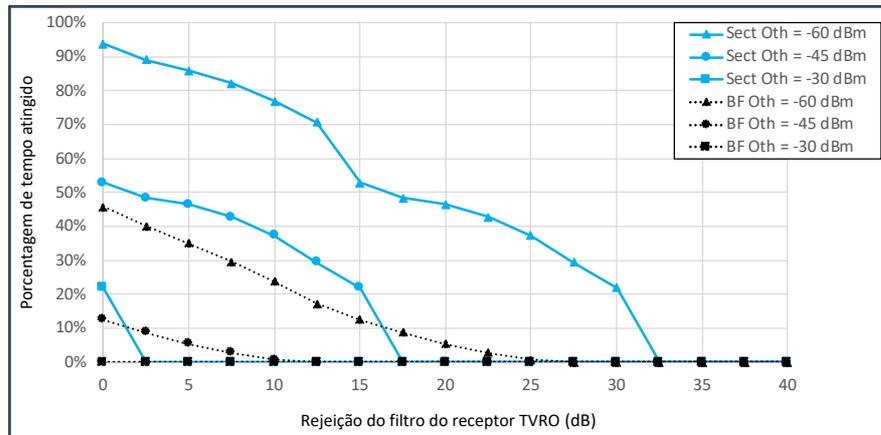


Figura 4. 15 - TVRO com elevação de 80° a 100m/Oeste da BS

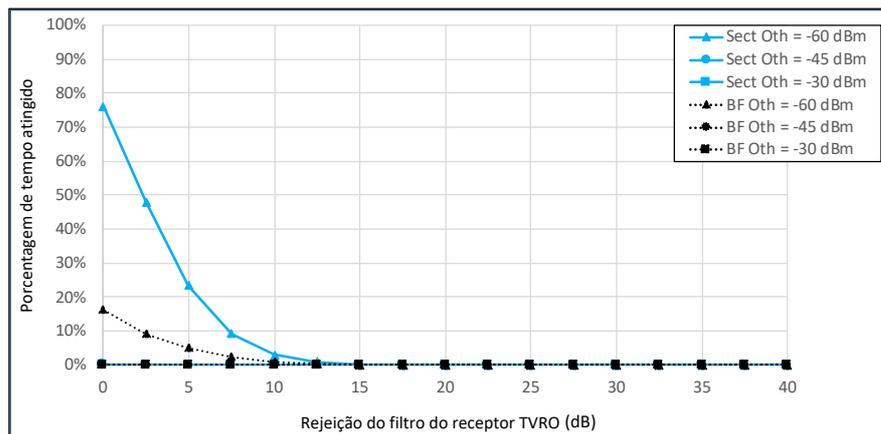


Figura 4. 16 - TVRO com elevação de 80° a 200m/Oeste da BS

4.7.1 NÍVEL DE REJEIÇÃO DOS FILTROS DE TVRO

Nas figuras 4.11 a 4.16 observa-se que nos cenários nos quais sistemas IMT utilizam antenas com conformação de feixe, os receptores TVRO podem utilizar filtros com, aproximadamente, 5 a 10 dB menos rejeição do que nos cenários nos quais os sistemas IMT utilizam antenas setoriais e, ainda assim, sofrer interferência prejudicial em porcentagens comparáveis de tempo. Além disso, como esperado, a interferência diminui quando se aumenta a distância entre o TVRO e a BS central ou a elevação da antena do TVRO.

Conforme [47] e os relatórios dos testes realizados pela Anatel em 2019 e 2020 [46], o nível de rejeição típico dos atuais receptores de TVRO é de -60 dBm, o que é considerado um

valor baixo e bastante sensível a saturação por interferências provenientes do sinal do sistema IMT. Observa-se que com um limiar de saturação de -45 dBm estas interferências ainda persistem tornando a convivência entre os sistemas inviável sem a adição de filtros adicionais.

Por outro lado, com limiar de saturação de -30 dBm o tempo em que o receptor TVRO sofre interferência prejudicial se torna muito baixo em praticamente todas as simulações nas quais o IMT emprega conformação de feixe, e, desta forma, um sistema de TVRO menos susceptível a interferência prejudicial, com filtros melhores e de melhor qualidade está melhor protegido contra interferência prejudicial.

4.7.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Na prática estes resultados sugerem que os sistemas podem conviver sem interferências na grande maioria dos casos em que os sistemas IMT empreguem antenas com conformação de feixe, desde que sejam utilizados sistemas de TVRO com limiar de saturação de -30 dBm, ou ainda limiar de saturação de -45 dBm (desconsiderando a proteção do filtro), com a inclusão de filtro no projeto do receptor que rejeite adicionalmente 15 dB. Os poucos casos de interferência que possam aparecer nestas configurações devem ser resolvidos caso a caso com análise específica.

Adicionalmente, para efeitos de comparação, realizaram-se simulações com a TVRO localizada na interseção entre dois setores, apontando para oeste, com elevação de 48° e a 100 metros da BS, com resultados mostrados na Figura 4.17.

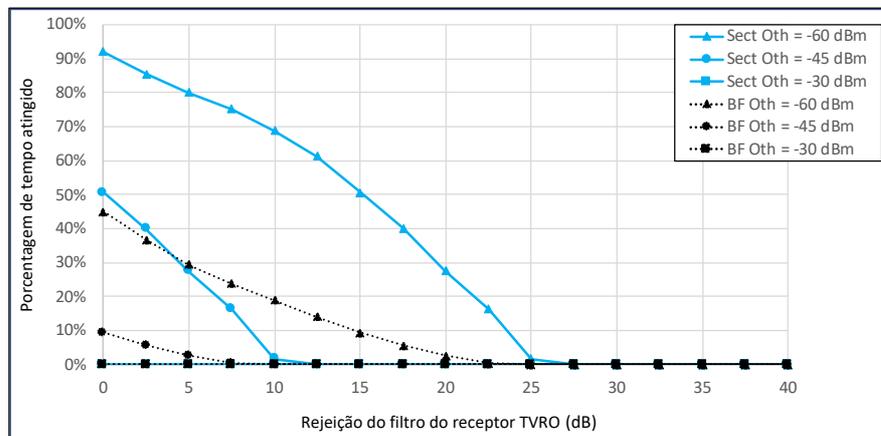


Figura 4. 17 - TVRO com elevação de 48° a 100m/Oeste e a 60° do eixo da BS

Quando comparados aos resultados análogos da Figura 4.12, observa-se uma menor interferência na estação TVRO na interseção entre dois setores, o que indica que o ganho agregado das antenas dos setores adjacentes não ultrapassa o ganho de pico de um setor.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo demonstrou a maior efetividade que a utilização de antenas com conformação de feixe em sistemas IMT-2020 na faixa de 3500-3600 MHz tem na mitigação de interferências, quando comparada à utilização de antenas setoriais, o que facilita a convivência com estações TVRO operando na faixa adjacente de 3625 – 4200 MHz (Banda C), em área urbana.

Nos cenários simulados, a utilização de filtros mais robustos de pelo menos 30 dB nos sistemas atuais de TVRO torna a convivência entre ambos os sistemas viável e com baixa probabilidade de interferência, seja temporal, seja espacial, quando da utilização de antenas com conformação de feixe nos sistemas IMT-2020.

Alternativamente, a utilização de receptores modernos de TVRO, com limiares de saturação de -30 dBm, resulta em uma baixa porcentagem de interferência prejudicial quando aliados a tecnologia de antenas com conformação de feixe. Na implementação real destes sistemas, em casos de interferências pontuais, estas podem ser tratadas de maneira específica caso a caso.

5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Futuros trabalhos podem ser realizados neste tema, como por exemplo:

- a) Avaliação da convivência entre os sistemas IMT-2020 com sistemas de recepção de TVRO utilizando antenas parabólicas considerando características de lóbulos laterais ao invés de apenas sua envoltória;
- b) Simulações de diferentes bandas de guarda com novos sistemas profissionais de mercado, conforme estes forem se tornando mais robustos, de forma a permitir a futura evolução do IMT-2020 na faixa de 3,5 GHz;
- c) A partir das mesmas modelagens utilizadas, simulações em novas faixas de frequências a serem consideradas para o futuro IMT;
- d) Simulações de convivência entre IMT-2020 e suas evoluções com outros sistemas de radiocomunicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CISCO, "VNI Mobile Forecast Highlights Tool," 2020. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/forecast-highlights-mobile.html.
- [2] ITU, "Report ITU-R M.2370-0 - IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030," 2015.
- [3] ITU, "Recommendation ITU-R M.2083-0 - IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," 2015.
- [4] ITU, "ITU World Radiocommunication Conference agrees key parameters for future communication technologies," 2019. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2019-PR24.aspx>.
- [5] MCTIC, "Portaria MCTIC nº 418, de 31.01.2020," 03 02 2020. [Online]. Available: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias/Portaria_MCTIC_n_418_de_31012020.html.
- [6] ANATEL, "CONSULTA PÚBLICA Nº 9," 17 02 2020. [Online]. Available: <https://sistemas.anatel.gov.br/SACP/Contribuicoes/TextoConsulta.asp?CodProcesso=C2308&Tipo=1&Opcao=andamento>.
- [7] MCOM, 29 01 2021. [Online]. Available: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-1.924/sei-mcom-de-29-de-janeiro-de-2021-301396768>.
- [8] Anatel, "ATA DE REUNIÃO - 896ª REUNIÃO DO CONSELHO DIRETOR," 25 02 2021. [Online]. Available: https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=7473585&id_orgao_publicacao=0.
- [9] Teletime, 19 03 2021. [Online]. Available: <https://teletime.com.br/19/03/2021/edital-do-5g-e-encaminhado-ao-tcu/>.
- [10] Anatel, "EDITAL Nº 1/2021," 27 09 2021. [Online]. Available: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO6OyRD8iqL9S9Xn8pP7_7nZL7eBIQWeOiWAZmPzrP88GsKp4NawWkp9n0q_6bMePRxnAsc5z5FRrLZQdkKAcHw.
- [11] Anatel, 27 09 2021. [Online]. Available: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-publica-edital-do-leilao-do-5g>.
- [12] Anatel, 23 11 2021. [Online]. Available: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-homologa-resultado-do-leilao-do-5g#:~:text=A%20Ag%C3%Aancia%20Nacional%20de%20Telecomunica%C3%A7%C3%B5es,GHz%2C%20o%20Leil%C3%A3o%20do%205G..>
- [13] Anatel, "Acórdão nº 381/2021," 19 11 2021. [Online]. Available: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO7E-xtOV_LRP_M7nFRNMRqqakySRJmeA_znS8CZHE8pIqgChqJ9bKAFF_rXLoA7OvLEfa-DufXKiv43DY6hVvAo.
- [14] IBGE, "PNAD Contínua TIC 2017," 2018.
- [15] E. Souza, A. Linhares and outros, "An Open Source Simulation Tool for Sharing and Compatibility Studies between 5G and Other Radiocommunication Systems," in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, 2017.
- [16] T. A. Bakaus, C. Queiroz, A. Linhares, E. Souza and U. Dias, Novembro 2020. [Online]. Available: <https://www.sbrt.org.br/sbrt2020/papers/1570649652.pdf>.
- [17] ITU, "Recommendation ITU-R M.1457-15 - Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)," 2020.
- [18] ITU, "Recommendation ITU-R M.2012-4 - Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT Advanced)," 2019.
- [19] ITU, "Report ITU-R M.2320 - Future technology trends of terrestrial IMT systems," 2014.
- [20] ITU, "Report ITU-R M.2376-0 - Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz," 2015.
- [21] ITU, "Report ITU-R M.2290-0 - Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT," 2013.
- [22] ITU, "Report ITU-R M.2243-0 - Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications," 2011.

- [23] ITU, "Report ITU-R M.2134-0 - Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)," 2008.
- [24] GSMA, 2020. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/futurenetworks/resources/an-introduction-to-network-slicing-2/>.
- [25] 3GPP, "ETSI TS 122 261 V16.12.0 - 5G; Service requirements for the 5G System (3GPP TS 22.261 version 16.12.0 Release 16)," 2020.
- [26] K. Samdanis, X. Costa-Perez and V. Sciancalepore, "From network sharing to multi-tenancy: The 5G network slice broker," *IEEE Communications Magazine - Vol.54*, pp. 32-39, July 2016.
- [27] ITU, "Recommendation ITU-T Y.3112 - Framework for the support of network slicing in the IMT-2020 network," 2018.
- [28] ITU, "Radio Regulations," 2020. [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2020>.
- [29] ITU, "World Radiocommunication Conferences," [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/Pages/default.aspx>.
- [30] M. El-Moghazi and J. Whalley, "IMT Spectrum Identification: An Obstacle for 5G Deployments?," in *TPRC47: The 47th Research Conference on Communication, Information and Internet Policy 2019*, 2019.
- [31] ITU, "Recommendation ITU-R M.1036-6 - Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications in the bands identified for IMT in the Radio Regulations," 2019.
- [32] ITU, "RESOLUTION 811 (WRC-19) - Agenda for the 2023 World Radiocommunication Conference," 2019.
- [33] Anatel, "Resolução nº 711, de 28 de maio de 2019," 2019. [Online]. Available: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2019/1285-resolucao-711>.
- [34] Anatel, 19 11 2021. [Online]. Available: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO7E-xtOV_LRP_M7nFRNMRqqakySRJmeA_znS8CZHE8pIqgChqJ9bKAFF_rXLoA7OvLEfa-DufXKiv43DY6hVvAo.
- [35] ITU, "Report ITU-R S.2278 - Use of very small aperture terminals (VSATS)," 2013.
- [36] ITU, "Report ITU-R S.2151-1 - Use and examples of systems in the fixed satellite service in the event of natural disasters and similar emergencies for warning and relief operations," 2012.
- [37] ITU, "REPORT ITU-R M.2109 - Sharing studies between IMT-Advanced systems and geostationary satellite networks in the fixed-satellite service in the 3 400-4 200 and 4 500-4 800 MHz frequency bands," 2007.
- [38] L. F. Abdulrazak, *Coexistence of IMT-Advanced Systems for Spectrum Sharing with FSS Receivers in C-Band and Extended C-Band*, Springer, 2018.
- [39] ITU, "Recommendation ITU-R P.452-16 - Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz," 2015.
- [40] ITU, "Recommendation ITU-R P.619-4 - Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth," 2019.
- [41] ITU, "Recommendation ITU-R P.2041-0 - Prediction of path attenuation on links between an airborne platform and Space and between an airborne platform and the surface of the Earth," 2013.
- [42] ITU, "Recommendation ITU-R P.2108-0 - Prediction of clutter loss," 2017.
- [43] ITU, "Recommendation ITU-R P.2109-1 - Prediction of building entry loss," 2019.
- [44] ITU, "Recommendation ITU-R F.1336-5 - Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile services for use in sharing studies in the frequency range from 400 MHz to about 70 GHz," 2019.
- [45] ITU, "Recommendation ITU-R M.2101-0 - Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies," 2017.
- [46] A. -. C. d. U. d. E. e. Órbita, 2019 e 2020. [Online]. Available: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/comites/comite-de-uso-do-espectro-e-de-orbita/reunioes-do-ceo-1>. [Accessed 22 06 2021].
- [47] L. Carisio and A. Linhares, "Coexistence conditions of LTE-advanced at 3400–3600 MHz with TVRO at 3625–4200 MHz in Brazil," *Wireless Networks*, 2017.

- [48] ITU, "Report ITU-R S.2368-0 - Sharing studies between IMT-Advanced systems and geostationary satellite networks in the fixed-satellite service in the 3 400-4 200 MHz and 4 500-4 800 MHz frequency bands in the WRC study cycle leading to WRC-15," 2015.
- [49] G. Castellanos, G. Teuta, P. H. Penagos and W. Joseph , "Coexistence for LTE-Advanced and FSS Services in the 3.5GHz Band in Colombia," 2020.
- [50] ITU, "Report ITU-R M.2292-0 - Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses," 2013.
- [51] ITU, "Recommendation ITU-R P.525-4 - Calculation of free-space attenuation," 2019.
- [52] ITU, "RECOMMENDATION ITU-R S.1432-1 - Apportionment of the allowable error performance degradations to fixed-satellite service (FSS) hypothetical reference digital paths arising from time invariant interference for systems operating below 30 GHz," 2006.
- [53] 3GPP, "TS 38.104 V16.3.0 - Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 16)," 2020.
- [54] ITU, "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," 2019.
- [55] ITU, "Final Acts WRC-03," 2003.
- [56] ITU, "Final Acts WRC-12," 2012.
- [57] B. (R.F.), "Study of sharing and compatibility of FSS and IMT operating in the 24.25-27.5 GHz frequency band," 2017. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0168/en>.
- [58] B. (R.F.), "Report on the sixth meeting of Task Group 5/1 (Geneva, Switzerland, 20-29 August 2018)," 2018. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0478/en>.
- [59] B. (R.F.), "SHARING STUDIES BETWEEN IMT-2020 AND THE FIXED-SATELLITE SERVICE IN THE BANDS 37-42.5 GHZ AND 42.5-43.5 GHZ," 2017. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0169/en>.
- [60] B. (R.F.), "UPDATE TO STUDY A ON SHARING AND COMPATIBILITY STUDIES OF IMT SYSTEMS AND FSS (EARTH-TO-SPACE) IN THE 42.5-43.5 GHz FREQUENCY RANGE," 2018. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0279/en>.
- [61] B. (R.F.), "Update to study a on sharing and compatibility studies of IMT systems and FSS (Earth-to-space) in the 42.5-43.5 GHz frequency range," 2018. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0400/en>.
- [62] B. (R.F.), "Update to study F on sharing and compatibility of FSS (space-to-Earth) and IMT operating in the band 37-42.5 GHz," 2018. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0401/en>.
- [63] B. (R.F.), "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. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0436/en>.
- [64] C. B. Queiroz, *Comunicações IMT-2020: Interferência e compartilhamento de frequência em ondas milimétricas*, UNB, 2019.
- [65] J.Pahl, *Interference Analysis*, UK: Wiley, 2016.
- [66] B. (R.F.), "An open-source implementation of Recommendation ITU-R M.2101," 2017. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-WP5D-C-0742/en>.
- [67] U. WP5D, "AN OPEN-SOURCE IMPLEMENTATION OF RECOMMENDATION ITU-R M.2101," [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/Pages/default.aspx>.
- [68] 3GPP, *TS 38.101-3 V15.8.0 (2019-12) - Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios (Release 15)*, 2019.
- [69] ITU, *Document 5D/1120-E. Liaison statement on characteristics of IMT-Advanced, IMT-2020 and advanced antenna systems for ITU-R sharing and compatibility studies in the frequency band 3 300-3 400 MHz*, 2018.
- [70] 3GPP, "TR 37.842 - Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access UTRA; Radio Frequency (RF) requirement background for Active Antenna System(AAS) Base Station(BS)," 2020.

- [71] 3GPP, "TR 37.840 - Technical Specification Group Radio Access Network; Study of Radio Frequency (RF) and Electromagnetic Compatibility (EMC) requirements for Active Antenna Array System (AAS) base station," 2013.
- [72] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [73] ITU, "Report ITU-R M.2334-0 - Passive and active antenna systems for base stations of IMT systems," 2014.
- [74] ANATEL, "Satellite landing rights authorized in Brazil," 2019. [Online]. Available: <https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documentoVersionado.asp?numeroPublicacao=288211&documentoPath=&Pub=&URL=/Portal/verificaDocumentos/documento.asp> .
- [75] B. (R.F.), *FSS PROTECTION CRITERIA TO BE USED IN STUDIES FOR WRC-19 AGENDA ITEMS 1.13 AND 1.14 FOR BANDS BETWEEN 24.25 AND 86 GHz - Contribution for ITU-R Working Part 4A*, 2018.