Estudos de Convivência entre Sistemas IMT-2020 e Sistemas FSS Profissionais

Maio/2020 Versão 1.1

Elaborado por:

Marcelo Tapajós, M.Sc. Agostinho Linhares, Dr. Frederico Neves, M.Sc. Alexandre Moraes, Dr. Alex Pires, M.Sc.



Sumário

Introdução3
Contextualização
Avaliação de distâncias mínimas devido às emissões indesejáveis fora da faixa de operação do sistema IMT7
Avaliação de distâncias mínimas devido ao sinal IMT adjacente à faixa FSS11
Conclusões17
Anexo A
Anexo B
Anexo C
Anexo D
Anexo E

Introdução

A utilização de sistemas de comunicações móveis de quinta geração (5G) na faixa de 3,5 GHz impõe que sejam tomados alguns cuidados para permitir a coexistência com os sistemas de satélite operando na banda C, uma vez que estações rádio base *massive* MIMO podem gerar, teoricamente, EIRP de 75 dBm. Além disso, cabe mencionar que tem ocorrido uma forte demanda para a maximização do espectro disponível para o 5G e como consequência disso as faixas de guarda (FG) tendem a serem minimizadas, aumentando a complexidade do equilíbrio entre a proteção do satélite e o estímulo do uso do 5G na faixa de 3,5 GHz.

Ao mesmo tempo essas demandas e novos desafios têm gerado uma resposta da indústria de componentes satelitais que estão criando soluções (novos filtros, novos *Low-Noise Blocks* - LNBs, etc.) que permitirão a melhoria substancial da imunidade ao 5G.

O objetivo deste estudo é a realização de uma análise determinística para estimação de distâncias mínimas para coexistência tomando por base diversos cenários, como, por exemplo, o emprego de filtros externos, LNBs *5G ready*, e/ou a combinação de ambos. Esse estudo adota uma abordagem de pior caso, variando para uma abordagem conservadora. Abordagem de pior caso pois modela a máxima potência de transmissão (valor nominal do equipamento), o limite de emissão indesejável menos restritivo (*Third*

Generation Partnership Project, 3GPP), com a menor atenuação no meio de propagação (espaço livre: ITU-R Rec.P.525-4¹), até chegar a uma antena de recepção com o pior diagrama de radiação dentre aqueles avaliados por simulação no laboratório do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) (de forma simplificada, envoltória de 0 dBi fora da região principal de emissão). De posse desses valores, ajustam-se esses elementos para buscar resultados mais realistas, mas ainda assim conservadores. Sobre a adoção dessa abordagem conservadora, vale a pena mencionar, que a ocorrência de dois ou mais parâmetros de entrada conservadores é possível, porém com baixa probabilidade (ver Anexo A).

Contextualização

Conforme descrito em vasta literatura técnica e no Relatório dos Testes de Convivência entre o IMT Operando na Faixa de 3,5 GHz e Sistemas Satelitais², realizado pela Anatel, os mecanismos mais comuns de interferência conhecidos na recepção do *Television Receive Only* (TVRO) com os sistemas operando em faixa adjacente são:

- 1) Saturação do receptor de TV: Ocorre em banda L³;
- Interferência no oscilador local do Low-Noise Block Downconverter/Low-Noise Block Feedhorn (LNB/LNBF): Causada por baixa isolação em relação ao misturador de entrada.

¹ <u>https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-4-201908-I/en</u>.

² <u>Relatório dos Testes de Convivência entre o IMT Operando na Faixa de 3,5 GHz e Sistemas Satelitais</u> <u>Operando em Faixa Adjacente</u> - Julho/2019 - Versão 3.0.

³ O receptor de satélite e os modems são projetados para aceitar sinais dentro de uma certa intensidade de sinal (normalmente -25 dBm a -65dBm).

- 3) Saturação e/ou intermodulação no LNB/LNBF: Nível excessivo do sinal (agregado) na entrada; e
- No LNBF multiponto, além da saturação e a intermodulação, existe outra espécie de interferência: a superposição dos sinais convertidos. Este efeito independe do nível de potência interferente;

Sendo que os principais mecanismos de interferência terrestre dos sinais *International Mobile Telecommunications* (IMT) no Serviço Fixo por Satélite (FSS) são:

- Emissões fora de faixa (OOBE) do 5G podem causar interferência na faixa para sinais FSS;
- Saturação do LNB ou do LNBF da estação terrena, mesmo que o sinal 5G seja adjacente ao sinal de satélite;



Figura 1 - BG entre IMT (5G) e Sistema Satelital (FSS).

Conforme mencionado no relatórios de testes de convivência de 3,5 GHz, para o combate à interferência entre o IMT e os sistemas de satélite é recomendável a adoção de uma série de medidas abrangentes, tais como: adição de um filtro de entrada à estação terrena, isolamento geográfico, instalação de blindagem, substituição do sintonizador, redução da potência de transmissão da estação base 5G, ajuste da direção máxima de radiação da antena da estação base 5G, etc. Ainda de acordo com o relatório o uso do filtro externo na frente do LNB profissional protege fortemente (de forma eficaz) o dispositivo contra interferência da faixa adjacente, sendo esse um dos primeiros passos de proteção a ser adotado.

O relatório apontou, entre outros, os seguintes pontos que destacamos abaixo:

- "O filtro externo com resposta para banda C estendida atenua tipicamente entre
 7 e 9 dB na frequência de 3,6 GHz. Desta forma, nas proximidades de 3,6 GHz
 ainda há uma resposta do Low Noise Amplifier (LNA) aos sinais de entrada."
- "Em relação ao sistema profissional cabe destacar que, usando filtro externo de banda C estendida, os resultados dos testes indicam que foi possível utilizar a máxima e.i.r.p. do sistema (valores na ordem de 75 dBm, por polarização). Mesmo para uma situação de proximidade (distância entre 65 a 70 metros) com frequências abaixo de 3,56 GHz. A e.i.r.p. admitida teve que ser reduzida, nas

proximidades de 3,6 GHz. Entende-se que tais possibilidades de interferências prejudiciais podem ser facilmente endereçadas no caso em que as estações licenciadas ou cadastradas possuem coordenadas geográficas conhecidas. 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. Ressalta-se ainda, nesse caso, conforme estabelece a regulamentação geral de administração do espectro, cabe a realização de atividade de coordenação prévia entre as partes no momento da instalação.

A proposta atual de edital de Licitação do 5G no Brasil considera a disponibilização da faixa de 3.300 MHz a 3.700 MHz, alinhado com a proposta do SINDITELEBRASIL e a ABINEE de disponibilização de espectro adicional de 100 MHz no Edital ora em debate, conforme apontado em correspondências recebidas do SINDITELEBRASIL (SEI nº 5012150) e da ABINEE (SEI nº 5009775).

Destaca-se que a utilização da faixa de radiofrequências de 3.300 MHz até 3.700 MHz por sistemas móveis poderá impactar também a faixa de frequência adjacente, mais especificamente, acima de 3.700 MHz. Como contramedida para viabilizar essa utilização poderá ser necessária a adoção de uma FG, a adoção de filtros para sistemas profissionais e/ou definição de distâncias mínimas entre estações, conforme a situação concreta.

Diversos estudos⁴ indicam valores de FG recomendável na ordem de 20 MHz a 40 MHz. Dadas as condições de contorno apresentadas acima a proposta inicial da Agência seria a definição de regras de coordenação prévia entre as estações a serem definidas em Ato da Superintendência de Outorga e Recursos à Prestação (SOR), que poderia concluir, por exemplo, na definição de uma FG dinâmica, isto é, a ser definida conforme o caso concreto.

Sobre o possível uso de sistemas IMT em redes privativas entre 3.700 MHz e 3.800 MHz que potencialmente também poderiam causar interferência cocanal, estes devem ser limitados à operação indoor ou outdoor de baixa potência (*small cell*) como forma de minimizar seu impacto, com definição de regras de coordenação prévia entre as estações (limitação da potência de operação, limitação do ganho de antena, limitação da altura da antena, etc.) a serem definidas em Ato da SOR. O presente trabalho não avalia o uso cocanal nessa faixa, que será objeto de estudo futuro. É possível adiantar que se espera que o uso cocanal, mesmo com *small cell*, poderá implicar em uma zona de proteção das estações terrenas que operam naquela faixa de vários quilômetros.

⁴ Estudos da Qualcomm (para a APT e IMDA) e da Nokia (para FCC e IMDA) indicam valores recomendáveis de faixa de guarda de 40 e 20 MHz, respectivamente.

Dentro da ideia de reposicionamento da faixa de operação para sistemas profissionais, cabe mencionar que, por exemplo, dentre os filtros profissionais de mercado⁵ estão disponíveis tipicamente filtros em guias de onda com as seguintes configurações de faixa passante:

- > 3.625 4.200 MHz;
- ➤ 3.660 4.200 MHz;
- ➤ 3.700 4.200 MHz;
- ➤ 3.754 4.200 MHz;
- ➤ 3.800 4.200 MHz;
- ➢ 3.900 − 4.200 MHz; e
- Filtro de transponder, onde o interessado define os 36 MHz de interesse e as faixas laterais são filtradas

Além disso começaram a surgir no mercado diversas soluções com LNBs mais robustos com rejeição específica para os sinais 5G. Esses LNBs são projetados para mitigar a interferência 5G, alguns deles incluem filtros passa-faixa miniaturizados antes do LNA, enquanto outros modelos após. Além disso, possuem um *mixer* que pode suportar maior potência e também filtragem na saída de FI, para reduzir fortemente o resíduo do sinal interferente que poderia chegar ao receptor/decodificador provocando degradação do mesmo. Dentre esses novos modelos de LNB há alguns que informam poder trabalhar com níveis de sinais interferentes na faixa adjacente na ordem de - 25 dBm na entrada do LNB.

Dessa forma, para sistemas profissionais, a princípio, existem diversas soluções de mercado que permitiriam a adequação da faixa passante, fora ainda sempre existir a possibilidade de se solicitar uma sintonia específica do filtro para o *range* desejado, não representando então uma dificuldade nesse requisito de filtragem dos sistemas profissionais.

Um ponto chave para o sucesso de coordenação entre os sistemas é o conhecimento *a priori* das localizações das estações terrenas, por isso, cabe também enfatizar a necessidade de que todas as estações com uso licenciado, inclusive as estações exclusivamente receptoras, sejam cadastradas e que possuam as coordenadas geográficas disponibilizadas no banco de dados de estações da Anatel. Com isso passaremos à avaliação das distâncias mínimas.

⁵ Norsat (<u>https://products.norsat.com/search?criteria=bpf-c</u>), Asiasat (<u>https://www.asiasat.com/technology/5Gfilter</u>), Avcomm (<u>https://www.avcomm.com.au/c-band-and-5g-interference</u>), dentre outros.

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

O modelo analítico usado nesse estudo para calcular a distância mínima de coordenação entre as estações de base 5G *New Radio* (NR) e as estações terrestres do FSS é baseado no modelo de espaço livre contido na Recomendação ITU-R P.525, critérios de proteção FSS especificados nas Recomendações ITU-R S.1432 e Relatório ITU-R M.2109, e máscaras de emissão de espúrios da estação base 5G NR especificadas no 3GPP TS38.104, bem como propostas de valores apresentadas por ou para outras agências reguladoras.⁶

Conforme visto na Figura 1 as ocorrências das emissões indesejáveis resultam em interferência cocanal que podem alterar a relação SNR (*Sinal-Noise Ratio*) pela elevação do piso de ruído do sistema receptor.

Parâmetro	Valor
Ganho da antena da estação terrena (>48°, ITU-	0, -4, -10 dBi ⁷
R S.465)	
Temperatura de ruído do sistema receptor	100 К
Frequência	3.700 MHz
Largura de faixa	10 MHz
relação I/N	-6; -10; -12,2 dB
Margem de Implementação	0; 6 dB

Tabela 1 – Parâmetros de Simulação.

Tabela 2 mostra as distâncias mínimas (km) relativas ao nível de emissões indesejáveis fora da faixa de operação do IMT 3,5 GHz com o ganho de envelope da antena da estação terrena variando de: 0, -4, -10 dBi e com margem de implementação de 0 dB em relação à referência indicada. As avaliações considerando valores de propagação do modelo de espaço livre podem apresentar valores de distâncias mínimas na ordem de centenas de quilômetros. Nas aplicações reais o tipo de *clutter*, a curvatura da terra, alturas das antenas e outros fatores fazem com que valores muito acima de dezenas de quilômetros já garantam uma isolação entre os sistemas, visto que dificilmente haverá uma linha de visada entre os sistemas e a perda de propagação nestes ambientes possui valores muito maiores do que os fornecidos pelo modelo de propagação do espaço livre. Essa situação motivou inclusive a apresentação de resultados mostrando, além do espaço livre, resultados de distância mínima utilizando modelo de propagação que consideram perdas adicionais para *clutter* de tipo urbano e suburbano.

⁶ OFCA (Hong Kong), FCC (EUA), etc.

⁷ Foi adotado o ganho de envelope da antena de -10 dBi (e acordo com a Rec. ITU-R S.465-6), 0 dBi para considerar antenas de baixa qualidade (é tolerável que antenas que não sejam de baixa de qualidade também tenham ganho perto de 0 dBi em ângulos de chegada perto de 90⁰, devido o *spillover*) e -4 dBi, que considera os sinais agregados que poderiam alcançar a antena com diferentes ângulos de chegada.

Tabela 2 – Distâncias mínimas (km) relativas ao nível de emissões indesejáveis fora da faixa de operação do IMT 3,5 GHz e ao ganho de envelope da antena da estação terrena (0, -4, -10 dBi) com margem de implementação⁸ de 0 dB em relação à referência.

distá	incias em km (baseado no	modelo de espaço livre)				
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	0	margem implementação (dB)	0		I/N (dB)	
referência	emissão indesejável	emissão indesejável	delta MHz	-6	-10	-12,2
	nivel dBm/100kHz	nivel dBm/1MHz	borda IMT			
3GPP conduzido	-7	3	0-5	122,140	193,579	249,378
	-13	-3	5-10	61,215	97,019	124,985
	-23	-13	10-40	19,358	30,680	39,524
	-62	-52	>40	0,217	0,344	0,443
3GPP OTA	2	12	0-5	43,337	68,684	88,483
	-4	6	5-10	21,720	34,424	44,346
	-14	-4	10-40	6,868	10,886	14,024
	-53	-43	>40	0,077	0,122	0,157
proposta 1	-13	-3	0-20	7,707	12,214	15,735
	-50	-40	20-40	0,109	0,1/3	0,222
	-62	-52	>40	0,027	0,043	0,056
proposta 2	-16	-6	20-40	5,456	8,647	11,139
	-40	-30	>40 & < 200	0,344	0,540	0,703
	-57	-47	/200	0,045	0,077	0,035
dista	incias em km (baseado no	modelo de espaço livre)				
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	-4	margem implementação (dB)	0		I/N (dB)	
referência	emissão indesejável	emissão indesejável	delta MHz	-6	-10	-12,2
	nivel dBm/100kHz	nivel dBm/1MHz	borda IMT			
3GPP conduzido	-7	3	0-5	77,065	122,140	157,347
	-13	-3	5-10	38,624	61,215	78,860
	-23	-13	10-40	12,214	19,358	24,938
	-62	-52	>40	0,137	0,217	0,280
3GPP OTA	2	12	0-5	27,344	43,337	55,829
	-4	6	5-10	13,704	21,720	27,981
	-14	-4	10-40	4,334	6,868	8,848
	-03	-43	>40	0,049	0,077	0,099
proposta 1	-13	-3	0-20	4,802	7,707	9,928
	-50	-40	>10	0,005	0,105	0,140
nronosta 2	-02	-52	20-40	3 //2	5,456	7 028
proposta z	-10	-30	>10.8 < 200	0 217	0 3//	0.443
	-57	-47	>200	0.031	0.049	0.063
			- 200	0,001	6,615	0,000
dista	ancias em km (baseado no	o modelo de espaço livre)			1/11/10)	
Ganno da antena da estação terrena (aBI)	-10	margem implementação (dB)	0	6	1/N (GB)	42.2
referencia	emissao indesejavei	emissao indesejavei	deita MHZ	-0	-10	-12,2
2CDD conduzido				20 624	61 015	70.060
	-7		5-10	10 259	20 690	29 524
	-13	-3	10-40	6 122	9 702	12 / 99
	-62	-52	>40	0.069	0,109	0.140
	2	12	0-5	13,704	21.720	27,981
	-4	6	5-10	6,868	10.886	14.024
	-14	-4	10-40	2,172	3,442	4,435
	-53	-43	>40	0.024	0.039	0,050
proposta 1	-13	-3	0-20	2,437	3,862	4,976
	-50	-40	20-40	0,034	0,055	0,070
	-62	-52	>40	0,009	0,014	0,018
proposta 2	-16	-6	20-40	1,725	2,734	3,523
	-40	-30	>40 & < 200	0,109	0,173	0,222
	-57	-47	>200	0,015	0,024	0,031

⁸ Os sistemas de telecomunicações são projetados com margem para atender os limites normativos, que ponderam incerteza de medição, variação de temperatura, envelhecimento do dispositivo entre outras coisas. Durante a Conferência Mundial de Radiocomunicações (WRC-19) se discutiu que essa margem varia tipicamente entre 6-10 dB.

Para emissões 3GPP conduzida foi considerado o ganho da antena não AAS (*Active Antena System*) igual a 18 dBi. Para os outros casos foram considerados valores OTA (*Over the Air*) com valores em TRP. A potência total radiada (TRP, *Total Radiated Power*) é uma medida de quanta energia é radiada por uma antena quando a antena é integrada a um transmissor real. A potência total recebida é calculada e resumida em todos os ângulos possíveis (portanto, é uma medição esférica ou tridimensional) e o resultado é a potência total radiada.

A Tabela 3 mostra as distâncias mínimas (km) relativas ao nível de emissões indesejáveis fora da faixa de operação do IMT 3,5 GHz com o ganho de envelope da antena da estação terrena variando de: 0, -4, -10 dBi e com margem de implementação de 6 dB em relação à referência indicada.

A Tabela 4 mostra as distâncias mínimas (km) em função da atenuação do espaço livre e para os *clutters:* suburbano e urbano⁹ (ganho de envelope da antena da estação terrena -4 dBi e com margem de implementação de 6 dB em relação à referência indicada).

Tabela 3 –Distâncias mínimas (km) relativas ao nível de emissões indesejáveis fora da faixa de operação do IMT 3,5 GHz e ao ganho de envelope da antena da estação terrena (0, -4, -10 dBi) com margem de implementação de 6 dB em relação à referência.

distá	àncias em km (baseado no	o modelo de espaço livre)				
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	0	margem implementação (dB)	6			
referência	emissão indesejável	emissão indesejável	delta MHz	-6	-10	-12,2
	nivel dBm/100kHz	nivel dBm/1MHz	borda IMT			
3GPP conduzido	-7	3	0-5	61,215	97,019	124,985
	-13	-3	5-10	30,680	48,625	62,641
	-23	-13	10-40	9,702	15,377	19,809
	-62	-52	>40	0,109	0,173	0,222
3GPP OTA	2	12	0-5	21,720	34,424	44,346
	-4	6	5-10	10,886	17,253	22,226
	-14	-4	10-40	3,442	5,456	7,028
	-53	-43	>40	0,039	0,061	0,079
proposta 1	-13	-3	0-20	3,862	6,122	7,886
	-50	-40	20-40	0,055	0,086	0,111
	-62	-52	>40	0,014	0,022	0,028
proposta 2	-16	-6	20-40	2,734	4,334	5,583
	-40	-30	>40 & < 200	0,173	0,273	0,352
	-57	-47	>200	0,024	0,039	0,050

⁹ Modelo de atenuação sem *shadowing*, artigo *Coexistence Conditions of LTE-Advanced at 3400-3600 MHz with TVRO at 3625-4200 MHz in Brazil*, Fernandes, Leandro Carísio; Linhares, Agostinho. Wireless Networks magazine – Springer, 2017.

distá	incias em km (baseado no	modelo de espaço livre)									
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	-4	margem implementação (dB)	6		I/N (dB)						
referência	emissão indesejável	emissão indesejável	delta MHz	-6	-10	-12,2					
	nivel dBm/100kHz	nivel dBm/1MHz	borda IMT								
3GPP conduzido	-7	3	0-5	38,624	61,215	78,860					
	-13	-3	5-10	19,358	30,680	39,524					
	-23	-13	10-40	6,122	9,702	12,499					
	-62	-52	>40	0,069	0,109	0,140					
3GPP OTA	2	12	0-5	13,704	21,720	27,981					
	-4	6	5-10	6,868	10,886	14,024					
	-14	-4	10-40	2,172	3,442	4,435					
	-53	-43	>40	0,024	0,039	0,050					
proposta 1	-13	-3	0-20	2,437	3,862	4,976					
	-50	-40	20-40	0,034	0,055	0,070					
	-62	-52	>40	0,009	0,014	0,018					
proposta 2	-16	-6	20-40	1,725	2,734	3,523					
	-40	-30	>40 & < 200	0,109	0,173	0,222					
	-57	-47	>200	0,015	0,024	0,031					
-57 -47 >200 0,015 0,024 0,031											
distá	àncias em <mark>k</mark> m (baseado no	modelo de espaço livre)									
distâ Ganho da antena da estação terrena (dBi)	àncias em km (baseado no -10	modelo de espaço livre) margem implementação (dB)	6	i	I/N (dB)						
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável	e delta MHz	-6	I/N (dB) -10	-12,2					
distâ Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz	6 delta MHz borda IMT	-6	I/N (dB) -10	-12,2					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3	6 delta MHz borda IMT 0-5	- 6 19,358	I/N (dB) -10 30,680	- 12,2 39,524					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10	- 6 19,358 9,702	I/N (dB) -10 30,680 15,377	- 12,2 39,524 19,809					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz -3 -3 -13	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40	-6 19,358 9,702 3,068	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862	- 12,2 39,524 19,809 6,264					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz -3 -3 -13 -52	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055	- 12,2 39,524 19,809 6,264 0,070					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3 -3 -13 -52 12	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5	- 6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886	- 12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -4	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3 -3 -13 -52 12 6	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456	- 12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -4 -4	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3 -3 -3 -13 -52 12 6 -4	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725	-12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028 2,223					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -4 -4 -14 -53	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40 >40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089 0,012	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725 0,019	- 12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028 2,223 0,025					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA proposta 1	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -4 -4 -14 -53 -13	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40 >40 0-20	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089 0,012 1,221	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725 0,019 1,936	-12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028 2,223 0,025 2,494					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA proposta 1	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -4 -4 -14 -53 -13 -50	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40 >40 0-20 20-40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089 0,012 1,221 0,017	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725 0,019 1,936 0,027	-12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028 2,223 0,025 2,494 0,035					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA proposta 1	incias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -62 2 -4 -14 -53 -13 -50 -62	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40 >40 0-20 20-40 >40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089 0,012 1,221 0,017 0,004	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725 0,019 1,936 0,027 0,007	-12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028 2,223 0,025 2,494 0,035 0,009					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA proposta 1 proposta 2	ncias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -4 -4 -14 -53 -13 -50 -62 -62 -62 -62 -62 -62 -62 -62	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3 -3	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40 >40 0-20 20-40 >40 20-40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089 0,012 1,221 0,017 0,004	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725 0,019 1,936 0,027 0,007 1,370	-12,2 39,524 19,809 6,264 0,077 14,024 7,028 2,223 0,025 2,494 0,035 0,009 1,765					
distă Ganho da antena da estação terrena (dBi) referência 3GPP conduzido 3GPP OTA proposta 1 proposta 2	ncias em km (baseado no -10 emissão indesejável nivel dBm/100kHz -7 -13 -23 -62 2 -62 2 -4 -4 -14 -53 -13 -50 -62 -62 -62 -62 -62 -62 -62 -62	modelo de espaço livre) margem implementação (dB) emissão indesejável nivel dBm/1MHz 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	6 delta MHz borda IMT 0-5 5-10 10-40 >40 0-5 5-10 10-40 >40 0-20 20-40 >40 20-40 >40 20-40 >40 20-40	-6 19,358 9,702 3,068 0,034 6,868 3,442 1,089 0,012 1,221 0,017 0,004 0,865 0,055	I/N (dB) -10 30,680 15,377 4,862 0,055 10,886 5,456 1,725 0,019 1,936 0,027 0,007 1,370 0,086	-12,2 39,524 19,809 6,264 0,070 14,024 7,028 2,223 0,025 2,494 0,035 0,009 1,765 0,111					

Tabela 3 – cont.

Tabela 4 – Distâncias mínimas (km) em função da atenuação do espaço livre e para os clutters: suburbano e urbano (ganho de envelope da antena da estação terrena -4 dBi e com margem de implementação de 6 dB em relação à referência indicada).

				E	Espaço livi	re		Suburband)	Urbano			
referência	emissão indesejável nivel dBm/100kHz	emissão indesejável nivel dBm/1MHz	delta MHz borda IMT	-6	-10	-12,2	-6	-10	-12,2	-6	-10	-12,2	
3GPP conduzido	-7	3	0-5	38,624	61,215	78,860	16,941	26,849	34,589	4,184	6,631	8,543	
	-13	-3	5-10	19,358	30,680	39,524	8,491	13,457	17,335	2,097	3,323	4,281	
	-23	-13	10-40	6,122	9,702	12,499	2,685	4,255	5,482	0,663	1,051	1,354	
	-62	-52	>40	0,069	0,109	0,140	0,064	0,090	0,108	0,056	0,072	0,081	
3GPP OTA	2	12	0-5	13,704	21,720	27,981	3,793	6,011	7,743	0,937	1,485	1,912	
	-4	6	5-10	6,868	10,886	14,024	3,013	4,775	6,151	0,744	1,179	1,519	
	-14	-4	10-40	2,172	3,442	4,435	0,953	1,510	1,945	0,235	0,373	0,480	
	-53	-43	>40	0,024	0,039	0,050	0,025	0,039	0,049	0,025	0,039	0,047	
proposta 1	-13	-3	0-20	2,437	3,862	4,976	1,069	1,694	2,182	0,264	0,418	0,539	
	-50	-40	20-40	0,034	0,055	0,070	0,035	0,053	0,065	0,035	0,049	0,057	
	-62	-52	>40	0,009	0,014	0,018	0,009	0,014	0,018	0,009	0,014	0,018	
proposta 2	-16	-6	20-40	1,725	2,734	3,523	0,757	1,199	1,545	0,197	0,296	0,382	
	-40	-30	>40 & < 200	0,109	0,173	0,222	0,090	0,125	0,147	0,072	0,089	0,099	
	-57	-47	>200	0,015	0,024	0,031	0,015	0,025	0,032	0,015	0,025	0,032	

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

O modelo analítico usado neste estudo para calcular a distância mínima de coordenação entre as estações de rádio base 5G NR e as estações terrenas do FSS é baseado no modelo de espaço livre contido na Recomendação ITU-R P.525, e em valores típicos de operação linear de dispositivos LNB profissionais.

Parâmetro	Valor
Frequência	3.700 MHz
Máxima EIRP da BTS	70 dBm por polarização
Largura de faixa	40, 60 e 100 MHz
Ganho da antena da estação terrena (>48°, ITU-	0, -4, -10 dBi
R S.465)	
Máximo nível de operação do LNB	-55 dBm, -60 dBm
Rejeição do filtro guia de onda Standard -	> 25 dB @ ± 50MHz
Sistema FSS	> 50 dB @ ± 100MHz
Perda de Inserção do filtro guia de onda	< 0,5 dB
Standard - Sistema FSS	

Tabela 5 – Parâmetros de Simulação.

Os cálculos apresentados nas Tabelas 6 e 7 foram feitos com potência do sistema IMT de 70 dBm por polarização e com filtro em guia de onda com curva *standard* para duas frequências de corte inferiores: 3,7 GHz e 3,754 GHz. Caso fosse empregado um filtro guia de onda *enhanced*, teríamos um aumento substancial da atenuação a partir de 20 MHz da borda inferior da faixa de passagem do sistema satelital, o acréscimo de atenuação seria da ordem de 30 a 35 dB quando comparado com a curva do filtro em guia de onda com curva *standard*, os resultados para essa análise podem ser vistos na Tabela 8.

Além disso, cabe mencionar que poderiam também ser empregados filtros de canal específicos sintonizados para ter a largura de faixa igual ao *transponder* utilizado pelo usuário de serviço satelital profissional. Claramente, nos resultados, observa-se que um afastamento maior entre as duas faixas de serviços garante uma maior isolação, esse benefício pode ser usufruído por aqueles usuários profissionais com serviços localizados em frequências acima de 3,8 GHz, obtendo-se com isso uma rejeição à interferência maior, mesmo fazendo uso de filtros com curva *standard*. Para a maximização da proteção a largura de faixa do filtro a ser utilizado deve ser o mais aderente possível à faixa realmente utilizada pelo usuário.

Tabela 6 – Distâncias mínimas (km) relativas ao nível transmissão do sinal IMT 3,5 GHz e ao ganho de envelope da antena da estação terrena (0, -4, -10 dBi), LNB com nível de operação de -55 dBm.

	distâncias em k	m (baseado	no modelo o	le espaço liv	/re)			
Máximo nível de operação do LNB (dBm)	-55							
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	0							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	16,10							
delta em MHz da freq. de 3,7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz		5,752	4,011	1,729	0,666	0,351	0,210	0,121
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 3 7 GHz							
portadora de BW = 60MHz	1110 3,7 012	7,410	5,174	2,230	0,858	0,452	0,271	0,156
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		9,022	6,299	2,712	1,042	0,549	0,329	0,190
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz		0,179	0,101	0,050	0,024	0,014	0,009	0,007
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 3.754 GHz							
portadora de BW = 60MHz		0,233	0,130	0,064	0,031	0,018	0,012	0,009
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		0,283	0,158	0,077	0,038	0,021	0,013	0,010
	distâncias em k	m (baseado	no modelo o	le espaço liv	/re)			
Máximo nível de operação do LNB (dBm)	-55							
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	-4							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	10,16							
delta em MHz da freq. de 3,7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz		3,629	2,531	1,091	0,420	0,221	0,133	0,077
distancia min km (c/ IRF) para uma	(III) - 0.7 (III)							
portadora de BW = 60MHz	TITTO 3,7 GHZ	4,675	3,264	1,407	0,541	0,285	0,171	0,099
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		5,692	3,975	1,711	0,657	0,346	0,208	0,120
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz		0,113	0,064	0,031	0,015	0,009	0,006	0,004
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 2 7E4 GHz							
portadora de BW = 60MHz	11110 3,7 34 0112	0,147	0,082	0,040	0,020	0,011	0,007	0,005
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		0,179	0,100	0,049	0,024	0,013	0,008	0,006
	distâncias em k	m (baseado	no modelo o	le espaço liv	/re)			
Máximo nível de operação do LNB (dBm)	-55							
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	-10							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	5,09							
delta em MHz da freq. de 3,7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz		1,819	1,269	0,547	0,211	0,111	0,066	0,038
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 2 7 GHz							
portadora de BW = 60MHz		2,343	1,636	0,705	0,271	0,143	0,086	0,049
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		2,853	1,992	0,858	0,329	0,173	0,104	0,060
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz		0,057	0,032	0,016	0,008	0,004	0,003	0,002
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 3,754 GHz							
portadora de BW = 60MHz		0,074	0,041	0,020	0,010	0,006	0,004	0,003
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		0,089	0,050	0,024	0,012	0,007	0,004	0,003

ubin.								
	distâncias em k	m (baseado	no modelo d	le espaço liv	/re)			
Máximo nível de operação do LNB (dBm)	-60							
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	0							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	28,63							
delta em MHz da freq. de 3,7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz]]	10,228	7,133	3,075	1,184	0,623	0,374	0,216
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 2 7 CHz							
portadora de BW = 60MHz	1110 5,7 012	13,176	9,200	3,966	1,525	0,804	0,482	0,278
distancia min km (c/ IRF) para uma	1							
portadora de BW = 40MHz		16,043	11,202	4,823	1,853	0,976	0,585	0,338
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz]	0,319	0,179	0,088	0,044	0,024	0,016	0,012
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 3 754 GHz							
portadora de BW = 60MHz	1110 5,754 GHz	0,414	0,231	0,114	0,056	0,032	0,021	0,015
distancia min km (c/ IRF) para uma	1							
portadora de BW = 40MHz		0,503	0,281	0,138	0,067	0,037	0,024	0,018
	distâncias em k	m (baseado	no modelo o	le espaço liv	/re)			
Máximo nível de operação do LNB (dBm)	-60							
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	-4							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	18,06							
delta em MHz da freq. de 3,7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz]	6,454	4,501	1,940	0,747	0,393	0,236	0,136
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 2 7 GHz							
portadora de BW = 60MHz	1110 3,7 GHZ	8,314	5,805	2,502	0,962	0,507	0,304	0,176
distancia min km (c/ IRF) para uma	1							
portadora de BW = 40MHz		10,123	7,068	3,043	1,169	0,616	0,369	0,213
distancia min km (c/ IRF) para uma								

Tabela 7 –Distâncias mínimas (km) relativas ao nível transmissão do sinal IMT 3,5 GHz e ao ganho de envelope da antena da estação terrena (0, -4, -10 dBi), LNB com nível de operação de -60 dBm.

	distâncias em k	m (baseado	no modelo (de espaço liv	vre)			
Máximo nível de operação do LNB (dBm)	-60							
Ganho da antena da estação terrena (dBi)	-10							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	9,05							
delta em MHz da freq. de 3,7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma				['		'		
portadora de BW = 100MHz		3,234	2,256	0,972	0,374	0,197	0,118	0,068
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 2 7 GHz		[]	['				
portadora de BW = 60MHz	11110 5,7 0112	4,167	2,909	1,254	0,482	0,254	0,152	0,088
distancia min km (c/ IRF) para uma			[]	['				
portadora de BW = 40MHz		5,073	3,542	1,525	0,586	0,309	0,185	0,107
distancia min km (c/ IRF) para uma				['		· · ·	· '	
portadora de BW = 100MHz		0,101	0,057	0,028	0,014	0,008	0,005	0,004
distancia min km (c/ IRF) para uma	filtro 2 7E4 GHz		[]	['				
portadora de BW = 60MHz	111tro 3,754 GHz	0,131	0,073	0,036	0,018	0,010	0,007	0,005
distancia min km (c/ IRF) para uma				'				
portadora de BW = 40MHz		0,159	0,089	0,044	0,021	0,012	0,007	0,006

0,201

0,261

0,318

filtro 3,754 GHz

0,113

0,146

0,177

0,056

0,072

0,087

0,027

0,035

0,042

0,015

0,020

0,023

0,010

0,013

0,015

0,008

0,010

0,011

portadora de BW = 100MHz

portadora de BW = 60MHz

distancia min km (c/ IRF) para uma

distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 40MHz Tabela 8 –Distâncias mínimas (km) relativas ao nível transmissão do sinal IMT 3,5 GHz e ao ganho de envelope da antena da estação terrena (0, -4, -10 dBi), LNB com nível de operação de -60 dBm e filtro em guia de ondas *enhanced*.¹⁰

	distâncias em k	um (baseado	no modelo	de espaço liv	/re)			
LNB max operating level (dBm)	-60							
Earth station off-axis gain (dBi)	0							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	73							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	28,63							
delta em MHz da freq. de 3.7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz	CH	х	х	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
distancia min km (c/ IRF) para uma	Tiltro 3,7 GHZ							
portadora de BW = 60MHz	enhanced @ 20	х	х	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
distancia min km (c/ IRF) para uma	MHz - 60 dB							
portadora de BW = 40MHz		х	x	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
			I	1				
	distancias em k	im (baseado	no modelo (de espaço IN	/rej			
LNB max operating level (dBm)	-60							
Earth station off-axis gain (dBi)	-4							
Pot IX NR total (dBm/100MHz)	/3							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	18,06							
delta em MHz da freq. de 3.7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 100MHz	filtro 3.7 GHz	Х	х	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
distancia min km (c/ IRF) para uma	enhanced @ 20							
portadora de BW = 60MHz	MHz - 60 dB	Х	х	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
distancia min km (c/ IRF) para uma								
portadora de BW = 40MHz		Х	Х	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
	distâncias om k	m (basoado	no modelo	do oceaso lis	(ro)			
INP may operating level (dPm)	60	un (baseauo	liomodelo	ue espaço in	nej			
Farth station off-axis agin (dBi)	-00							
Pot TX NR total (dBm/100MHz)	-10							
distancia min km (s/ filtragem adicional)	9.05							
distancia min kin (sy mulagem adicionary	5,05							
delta em MHz da freg. de 3.7 GHz		0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRE) nara uma			10	20	50	40	50	00
portadora de BW = 100MHz		x	x	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
distancia min km (c/ IRE) para uma	filtro 3,7 GHz			5,505	3,305	3,305	5,505	5,505
portadora de BW = 60MHz	enhanced @ 20	x	x	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
distancia min km (c/ IRF) para uma	MHz - 60 dB			5,505	3,305	3,305	5,505	5,505
portadora de BW = 40MHz		х	x	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009

As simulações apresentadas na Tabela 9 comparam os resultados da distância mínima utilizando o caso perda por espaço livre e atenuação devido a *clutters*: suburbano e urbano¹¹ (com filtro em guia de onda com curva standard para duas frequências de corte inferiores: 3,7 GHz e 3,754 GHz, e ganho de envelope da antena terrena -4 dBi, LNB com nível de operação de -60 dBm).

¹⁰ A especificação do filtro mostra que a atenuação é maior que 60 dB a partir de 20 MHz de espaçamento. Utilizamos X para indicar que valores abaixo de 20 MHz de espaçamento não estavam disponíveis no momento da análise.

¹¹ Modelo de atenuação sem *shadowing*, artigo *Coexistence Conditions of LTE-Advanced at 3400-3600 MHz with TVRO at 3625-4200 MHz in Brazil*, Fernandes, Leandro Carísio; Linhares, Agostinho. Wireless Networks magazine – Springer, 2017.

Tabela 9 – Distâncias mínimas (km) em função do *clutter* (espaço livre, suburbano e urbano) relativas ao nível transmissão do sinal IMT 3,7 GHz (ganho de envelope da antena da estação terrena -4 dBi, LNB com nível de operação de -60 dBm).

delta em MHz da freq. de 3,7 GHz	clutter	0	10	20	30	40	50	60
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	FSPL_100	6,454	4,501	1,940	0,747	0,393	0,236	0,136
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	PLSub_100	2,831	1,974	0,851	0,328	0,206	0,153	0,106
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	PLUrb_100	0,699	0,488	0,210	0,154	0,124	0,102	0,080
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	FSPL_60	8,314	5,805	2,502	0,962	0,507	0,304	0,176
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	PLSub_60	3,646	2,546	1,097	0,422	0,236	0,178	0,126
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	PLUrb_60	0,901	0,629	0,271	0,167	0,136	0,113	0,090
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 40MHz	FSPL_40	10,123	7,068	3,043	1,169	0,616	0,369	0,213
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 40MHz	PLSub_40	4,440	3,100	1,335	0,513	0,270	0,199	0,143
distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 40MHz	PLUrb_40	1,097	0,766	0,330	0,177	0,145	0,121	0,098
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz	clutter	0	10	20	30	40	50	60
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	clutter FSPL_100	0 0,201	10 4,501	20 0,056	30 0,027	40 0,015	50 0,010	60 0,008
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	clutter FSPL_100 PLSub_100	0 0,201 0,138	10 4,501 0,093	20 0,056 0,054	30 0,027 0,028	40 0,015 0,015	50 0,010 0,010	60 0,008 0,008
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100	0,201 0,138 0,095	10 4,501 0,093 0,073	20 0,056 0,054 0,050	30 0,027 0,028 0,028	40 0,015 0,015 0,015	50 0,010 0,010 0,010	60 0,008 0,008 0,008
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz	clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100	0 0,201 0,138 0,095	10 4,501 0,093 0,073	20 0,056 0,054 0,050	30 0,027 0,028 0,028	40 0,015 0,015 0,015	50 0,010 0,010 0,010	60 0,008 0,008 0,008
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km {c/ IRF} para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km {c/ IRF} para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km {c/ IRF} para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km {c/ IRF} para uma portadora de BW = 60MHz	clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100 FSPL_60	0 0,201 0,138 0,095 0,261	10 4,501 0,093 0,073 0,146	20 0,056 0,054 0,050 0,072	30 0,027 0,028 0,028 0,035	40 0,015 0,015 0,015 0,020	50 0,010 0,010 0,010 0,013	60 0,008 0,008 0,008 0,010
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100 FSPL_60 PLSub_60	0 0,201 0,138 0,095 0,261 0,163	10 4,501 0,093 0,073 0,146 0,111	20 0,056 0,054 0,050 0,072 0,066	30 0,027 0,028 0,028 0,035 0,035	40 0,015 0,015 0,015 0,020 0,020	50 0,010 0,010 0,010 0,013 0,013	60 0,008 0,008 0,008 0,010 0,010
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	Clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100 FSPL_60 PLSub_60 PLUrb_60	0 0,201 0,138 0,095 0,261 0,163 0,106	10 4,501 0,093 0,073 0,146 0,111 0,082	20 0,056 0,054 0,050 0,072 0,066 0,057	30 0,027 0,028 0,028 0,035 0,035 0,035	40 0,015 0,015 0,015 0,020 0,020 0,020	50 0,010 0,010 0,013 0,013 0,013	60 0,008 0,008 0,008 0,010 0,010 0,010
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	Clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100 FSPL_60 PLSub_60 PLUrb_60	0 0,201 0,138 0,095 0,261 0,163 0,106	10 4,501 0,093 0,073 0,146 0,111 0,082	20 0,056 0,054 0,050 0,072 0,066 0,057	30 0,027 0,028 0,028 0,035 0,035 0,035	40 0,015 0,015 0,015 0,020 0,020 0,020	50 0,010 0,010 0,013 0,013 0,013	60 0,008 0,008 0,008 0,010 0,010 0,010
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz	Clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100 PLUrb_100 PLSub_60 PLUrb_60 PLUrb_60 FSPL_40	0,201 0,138 0,095 0,261 0,163 0,106 0,318	10 4,501 0,093 0,073 0,146 0,111 0,082 0,177	20 0,056 0,054 0,050 0,072 0,066 0,057 0,087	30 0,027 0,028 0,028 0,035 0,035 0,035 0,035	40 0,015 0,015 0,020 0,020 0,020 0,020 0,023	50 0,010 0,010 0,013 0,013 0,013 0,013 0,015	60 0,008 0,008 0,008 0,010 0,010 0,010 0,011
delta em MHz da freq. de 3,754 GHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 100MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 60MHz distancia min km (c/ IRF) para uma portadora de BW = 40MHz	Clutter FSPL_100 PLSub_100 PLUrb_100 FSPL_60 PLSub_60 PLUrb_60 FSPL_40 PLSub_40	0,201 0,138 0,095 0,261 0,163 0,106 0,318 0,183	10 4,501 0,093 0,073 0,146 0,111 0,082 0,177 0,127	20 0,056 0,054 0,050 0,072 0,066 0,057 0,087 0,076	30 0,027 0,028 0,035 0,035 0,035 0,035 0,035 0,042 0,043	40 0,015 0,015 0,020 0,020 0,020 0,020 0,023 0,023	50 0,010 0,010 0,013 0,013 0,013 0,013 0,015 0,015	60 0,008 0,008 0,000 0,010 0,010 0,011 0,011

A Tabela 10 ilustra algumas combinações de LNB e filtros, presentes no mercado profissional, que têm diferentes perdas de inserção e figura de ruído. Com isso se verifica como o desempenho do sistema pode ser afetado. Conforme se verifica, soluções mais extremas conseguem aumentar em muito a imunidade à interferência externa mas, por outro lado, têm um impacto em termos de degradação da relação G/T do sistema. Assim, é importante ter um equilíbrio entre a solução de imunidade com o desempenho G/T do sistema.

	< Perda de Inserção (dB)	< LNB NF (dB)	variação no G/T (dB)
LNB standard (std)	0	0,4	0,00
LNB std + filtro externo std	0,5	0,4	-1,83
LNB std + filtro externo enhanced	1,3	0,4	-3,98
LNB enhanced 1 (e1)	0	0,43	-0,13
LNB e1 + filtro externo std	0,5	0,43	-1,93
LNB e1 + filtro externo enhanced	1,3	0,43	-4,05
LNB enhanced 2 (e2)	0	0,6	-0,80
LNB e2 + filtro externo std	0,5	0,6	-2,43
LNB e2 + filtro externo enhanced	1,3	0,6	-4,43

Tabela 10 – Variação em dB no G/T^{12} de uma antena de 2,4 m ao se utilizar diferentes combinações de LNB^{13,14}, filtros^{15,16}, etc.

Como visto na tabela acima, existe uma relação de compromisso entre a extensão da proteção e uma variação do nível de G/T do sistema. No caso do satélite C2, o principal satélite utilizado para *broadcast* de tv via satélite, ele será substituído pelo satélite D2 cuja EIRP deve ter um aumento entre 3 a 6 dB, a depender da posição do território nacional. Esta variação da EIRP é benéfica para melhorar a relação G/T dos sistemas receptores.

¹² Referência adotada é a entrada do LNB/LNA e T_{antena}=46 °K.

¹³ LNB *enhanced* 1 possui filtro em guia de ondas miniaturizado na frente do LNA com as seguintes características de rejeição total antes do *mixer*: > 40dB @ \pm 50 MHz e > 95 dB @ \pm 100 MHz, enquanto que a curva do filtro da frente do LNA segue os valores do filtro *standard* (rejeição: > 25 dB @ \pm 50 MHz e > 50 dB @ \pm 100 MHz).

 ¹⁴ O LNB *enhanced* 2 possui filtro de proteção após o LNA e tem as seguintes características de rejeição:
 -25 dBm *interference signal* @ ± 100 MHz sem degradação da performance do LNB.

¹⁵ Filtro de guia de onda *standard* tem perda de inserção < 0,5 dB e rejeição: > 25 dB @ \pm 50 MHz e > 50 dB @ \pm 100 MHz.

¹⁶ Filtro de guia de onda *enhanced* tem perda de inserção < 1,5 dB e rejeição: > 60 dB @ - 20 MHz, > 25 dB @+30 MHz.

Conclusões

A coexistência entre 5G e sistemas profissionais do FSS em faixas adjacentes é viável. A combinação de LNBs comuns e filtro passa faixa em guia de onda (BPF, band pass filter) resolverá a maioria dos problemas de interferência quando o sinal 5G estiver a pelo menos 50 MHz da faixa passante. Nos casos em que as FGs são menores, 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, ajuste da direção de radiação máxima da antena 5G, adoção de distâncias mínimas (separação espacial), isolamento geográfico ou o uso de filtros de guia de onda mais seletivos (eBPF, enhanced band pass filter), instalação de blindagem, substituição do sintonizador, entre outros. Filtros eBPF têm sido desenvolvidos especificamente para a situação de uso dos Estados Unidos da América, com requisito de FG de 20 MHz entre a faixa IMT e FSS. As características típicas deste tipo de filtro são: perda de inserção < 1,3 dB e rejeição > 60dB @ - 20MHz. Neste caso se observa uma grande seletividade a apenas 20 MHz de distância da faixa de frequência do sistema FSS, porém, associado ao uso deste tipo de solução existe um trade-off a ser avaliado em termos de relação aumento de imunidade e eventual impacto na variação do nível de G/T do sistema.

O estudo apresentou resultados de distância mínima utilizando modelos de propagação de espaço livre, de *clutter* urbano e suburbano; considerando diversos valores de emissões indesejáveis da estação rádio base, e para algumas combinações de LNB e filtro profissional para proteção contra bloqueio do sistema satelital. Para o caso de bloqueio foram utilizadas FGs variando de 0 a 60 MHz, com portadoras 5G com largura de canal de 40, 60 e 100 MHz.

Para garantir que o espectro de recepção do satélite seja imune a interferências 5G pode ser necessário, no caso concreto, uma combinação de filtros de guia de onda e LNBs especialmente projetados para a convivência. Os filtros em guia de ondas *standard*, por si só, podem não fornecer imunidade suficiente a depender do afastamento em frequência e isolação entre o 5G e o sistema FSS, para interferências próximas à faixa FSS, uma vez que a atenuação é dependente do *roll-off* do filtro. Da mesma forma, o uso exclusivo de LNBs 5G ready (projetados com filtros RF integrados após o LNA, misturadores de alta potência e filtros IF) a depender do caso concreto podem também não fornecer sozinhos a imunidade necessária. Assim o que se verifica é que as combinações de dispositivos e/ou ações de mitigação podem permitir soluções personalizadas que fornecem a imunidade necessária ao sistema FSS em relação ao 5G enquanto maximizam o desempenho do sistema satelital.

Anexo A

Modelo estatístico com abordagem conservadora

Considere um sistema que seja a combinação de três elementos, cada um representado por um processo estocástico. O sistema também será representado por um processo estocástico, cuja função densidade será a convolução das funções densidade que representam cada dispositivo, dado que esse processo é somativo.

Assim, seja o sistema representado pela variável aleatória Z, e cada elemento pelas variáveis aleatórias X_1, X_2, X_3 .

Logo,

$$Z = X_1 + X_2 + X_3$$

Considerem que X_i sejam variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), com função densidade normal (curva de Gauss), de média μ e desvio padrão σ .

$$\sigma_Z^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = 3\sigma^2$$
,

 $f_X = N(\mu, \sigma).$

$$\sigma_{z} = \sqrt{3}\sigma$$
.

Se for modelado um sistema similar a esse com o valor médio de referência igual ao valor médio real, então o resultado para o valor esperado de sistema será a soma dos valores médios individuais.

$$E\{Z\} = E\{X_1\} + E\{X_2\} + E\{X_3\}.$$

Todavia, sejamos conservadores e cada elemento modelemos com o valor médio igual à média mais um desvio padrão.

$$E\{X'\} = E\{X\} + \sigma.$$

Este novo valor médio será maior do que 84% dos valores possíveis, conforme gráfico abaixo, Figura 2.

Se cada um dos três elementos for modelado dessa forma, então o valor médio do novo sistema será:

$$E\{Z'\} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + 3\sigma$$
$$E\{Z'\} = E\{Z\} + 3\sigma.$$

Mas $\sigma_Z = \sqrt{3}\sigma$, logo:



Figura 2 - Variação da função densidade de probabilidade em uma abordagem conservadora.

O valor médio $E\{Z'\}$ será maior do que 96% dos valores possíveis de Z, quando na realidade deveria ser 50%.

É aproximadamente isso que acontece quando se modela o lado da transmissão, o meio de propagação e o lado de recepção de forma conservadora.

Por fim, a abordagem de pior caso apresenta uma situação de raríssima ocorrência, pois todos os processos aleatórios da cadeia precisariam ocorrer simultaneamente na pior situação possível.

Anexo B

Determinação do valor de IRF do sistema receptor utilizando um filtro de guia de ondas.

Foram realizadas simulações para a avaliação de IRF¹⁷ com canais de largura de faixa de 10, 20, 40, 60 e 100 MHz, deslocando a frequência superior esquerda do canal de 0 a 60 MHz, em passos de 10 MHz, em relação à frequência de 3,7 GHz, conforme indicada na Figura 3.



Figura 3 - Determinação da IRF considerando filtro de guia de ondas standard.

A Figura 4 ilustra os valores obtidos para IRF considerando canais IMT com largura de faixa de 10, 20, 40, 60 e 100 MHz e o filtro guia de ondas *standard*¹⁸ no sistema FSS.



Figura 4 - valores de IRF obtidos na simulação.

¹⁷ IRF (fator de redução de interferência) ou NFD (Net Filter Discrimination) é uma razão (dB) relacionada para o tipo de espectro transmitido e a seletividade da filtragem no receptor. Ele expressa a porção residual de um espectro interferente a um dado espaçamento de frequência em relação ao canal do receptor.

 $^{^{18}}$ Filtro de guia de onda *standard* tem perda de inserção < 0,5 dB e rejeição: > 25 dB @ ± 50 MHz e > 50 dB @ ± 100 MHz.

A Figura 5 ilustra uma simulação do resíduo da portadora IMT que atingiria o primeiro estágio do LNB, após a passagem pelo filtro de entrada em guia de ondas standard.



Figura 5 - Simulação do resíduo do sinal do transmissor BW = 40 MHz após filtro banda C estendida (3,7 a 4,2 GHz)¹⁹.



Figura 6 - Simulação do resíduo do sinal do transmissor BW = 100 MHz após filtro banda C estendida (3,7 a 4,2 GHz¹⁹).



Figura 7 - Exemplo da distribuição cumulativa da potência rejeitada^{20,21} após filtro banda C estendida (3,7 a 4,2 GHz¹⁹⁸).

¹⁹ Neste exemplo emissões espúrias são consideradas desprezíveis, e seu efeito é considerado no estudo de emissões indesejáveis.

²⁰ Neste texto os termos potência residual da portadora ou potência rejeitada da portadora são considerados sinônimos.

²¹ Cálculo realizado para portadora com largura de faixa de 100 MHz.

A Figura 7 mostra que 99% da potência²² residual (ou rejeitada²⁰) se concentra dentro de 33 MHz a partir da faixa de passagem do filtro de recepção.

Para operadores de sistemas profissionais que tem sinal somente dentro da banda C a partir de 3,8 GHz, por exemplo, é mais aconselhável utilizar o filtro mais restrito em largura de faixa (3,8 a 4,2 GHz), pois aumenta em muito a proteção de seu sistema receptor. Conforme pode ser visto na Figura 8, o uso de um filtro com faixa de passagem a partir de 3,754 GHz faz com que a seletividade na região de 3,7 GHz seja muito maior, diminuindo o resíduo do sinal IMT.



Figura 8 - Simulação do resíduo do sinal do transmissor BW = 400 MHz após filtro banda C estendida (3,754 a 4,2 GHz¹⁹).

O valor de seletividade em dB provido pelo IRF será adicionado à discriminação do sistema receptor em relação ao sistema interferente.

²² Tipicamente 99% da Potência define a largura de faixa ocupado por canal, Recomendação ITU-R SM.328-11.

Anexo C

Emissões indesejáveis pelo sistema 5G.

Com o objetivo de limitar e minimizar o possível impacto das emissões indesejáveis imediatamente após o bloco de frequências destinado ao IMT (3,3 a 3,7 GHz) deve-se limitar os níveis na região de transição desse bloco em direção as faixas adjacentes, de forma a limitar a possível interferência cocanal devido ao acréscimo dos limiares de I/N nas faixas adjacentes. Em especial entre 3,7 a 4,2 GHz e 4,5 a 4,8 GHz, devido ao uso dessas faixas por serviços de recepção satelital. Na faixa de 3,1 a 3,3 GHz existe o potencial uso desse faixa por sistemas de radiolocalização militares.

A Figura 9 ilustra a faixa ao IMT (3,3 a 3,7 GHz) e as faixas de transição em direção às faixas adjacentes.



Por esse motivo foi realizado o estudo de avaliação de distâncias mínimas devido às emissões indesejáveis fora da faixa de operação do sistema IMT. Utilizamos os valores de referência do 3GPP, tanto conduzido como radiado, além de 2 outros valores. Juntamente com esse estudo recomenda-se que um cuidado especial deve ser adotado com relação à homologação da Estação Base/ estação móvel veicular ou terminal para sistemas que operam até 3,7 GHz. Deve ser garantido que o filtro de canal do transmissor esteja adequado à faixa de transmissão desejada e com isso as emissões fora da faixa estejam definidas a partir da borda de transmissão do IMT, isto é, a partir de 3,7 GHz.

Conforme pode ser visto na Figura 10, todo transmissor tem um piso de ruído inband, este ruído assume uma forma AWGN (Additive White Gaussian Noise) limitado pela curva do filtro de canal do transmissor. É importante que existam mecanismos na homologação dos sistemas IMT que evitem que, por exemplo, uma Estação Base, cuja

²³ Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR), Out Of Band Unwanted Emission (OOBUE).



faixa passante seja de 3,6 GHz a 3,8 GHz (vide Figura 11

Figura 11), seja utilizado, pois o piso de ruído *inband* do transmissor presente entre 3,7 GHz e 3,8 GHz seria radiado atuando como uma interferência cocanal para os sistemas satelitais compartilhando a mesma faixa de radiofrequências. Dessa forma poderão ser definidos limites mais restritivos do que aqueles do 3GPP, para garantir a coexistência entre os sistemas que operam em faixas adjacentes, assim como foi feito nos EUA, Hong Kong, dentre outros.



Figura 10 - Piso de ruído inband de um transmissor.

Na Figura 10, à direita, é possível ver a portadora acima do piso de ruído de um transmissor. Enquanto na Figura 11, ilustramos um caso hipotético de uso de um *hardware* Banda 43 do padrão 3GPP (faixa de frequência de 3,6 a 3,8 GHz), onde teríamos o piso do ruído do transmissor (um ruído *inband*) se sobrepondo à faixa destinada ao sistema FSS. Esse é o caso típico que devemos evitar através de requisitos de homologação.



Figura 11 - Estação Base com banda passante de 3,6 GHz a 3,8 GHz.

A Figura 12, mostra um caso real medido durante os testes de convivência entre o IMT Operando na Faixa de 3,5 GHz e sistemas satelitais.



Figura 12 - Exemplo de Estação Base com faixa passante de 3,4 GHz a 3, 6 GHz, portadora em 3,45 GHz, com largura de faixa de 100 MHz.

A Figura 13Figura 12, mostra um caso de simulação de emissão de um *hardware* B43 com a faixa de 3,7 a 3,8 GHz se sobreponde a faixa de passagem do filtro do sistema FSS. Mostrando o resíduo do sinal IMT (do *hardware* B43) após a curva do filtro em guia com curva standard (faixa passante de 3,7 a 4,2 GHz).



Figura 13 - Exemplo de Simulação de emissão de um hardware B43 com a faixa de 3,7 a 3,8 GHz após a passagem pelo filtro em guia de 3,7 a 4,2 GHz.

A Figura 14Figura 12, mostra exemplo de uma medição real de emissão de um *hardware* B43 com a faixa de 3,7 a 3,8 GHz após o filtro em guia de onda do sistema FSS, com faixa de passagem de 3,7 a 4,2 GHz. Percebe-se claramente o resíduo da portadora IMT além da presença do piso de ruído do HW B43.



Figura 14 - Exemplo medição de emissão de um hardware B43 com a faixa de 3,7 a 3,8 GHz após a passagem pelo filtro em guia de 3,7 a 4,2 GHz.

Anexo D

Determinação da temperatura de ruído do sistema satelital.

A determinação da temperatura de ruído do sistema satelital foi realizada para o ponto de referência q, considerado na frente do dispositivo LNB/LNA.



Figura 15 - Ponto de Referência para a determinação da Temperatura de ruído do Sistema FSS²⁴.

A temperatura de ruído do sistema (Tsys) é dada pela equação abaixo: $Tsys = \frac{Ta}{Lf} + \frac{T0}{Lf} * (Lf - 1) + Tr$ Equação 1^{24,25}

Onde:

Ta = Temperatura da antena em ∘K. Lf = perda da linha de transmissão em dB. TO = Temperatura de referência, 290 ∘K. Tr = Temperatura equivalente de ruído do LNB/LNA em ∘K, dada por:

 $Tr = T0 * (10^{NF/10} - 1)$ Equação 2

Onde:

NF = Figura de ruído do LNB/LNA em dB.

$$\frac{G}{T}\left(\frac{dB}{K}\right) = (Gant(dBi) - Lf) - 10 * log10(Tsys(\circ K))$$
Equação 3
$$\Delta \frac{G}{T}(dB) = G/T_{newcondition} - G/T_{ref}$$
Equação 4

²⁴ INTERFERENCE ANALYSIS - MODELLING RADIO SYSTEMS FOR SPECTRUM MANAGEMENT. John Pahl, Transfinite Systems Ltd, UK. John Wiley & Sons, 2016.

²⁵ The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook, Second Edition. Bruce Elbert. ARTECH HOUSE, 201.

Anexo E

Fórmulas para Cálculo da distância mínima.

Caso emissões indesejáveis:

 $Nvr = 10log10(Trec) + 10log10(BW) + 10log(1,38E^{-23}/1mW)$ Equação 5

Onde:

Nvr = Noise in victim bandwitdh em dBm.

Trec = Receiving system noise temperature em °K.

BW = 10 MHz.

N floor = Nvr + I/N Equação 6

Onde:

Nfloor = maximum noise floor degradation em dB.

 $Ue = 10log10(Ue_{PSDN} * 10)$ Equação 7

Onde:

Ue = Unwanted emissions power (BW = 10 MHz) em dBm. Ue_{PSD} = Unwanted emissions PSD em dBm/100 kHz.

 $MAPL = Ue + Gant_{5GNR} + Gant_{FSS} - N floor$ Equação 8

Onde:

MAPL = Maximum Available Path Loss em dB.

Gant_{SGNR} = 5G NR antenna Gain em dBi (18 dBi somente para antena não AAS, para AAS²⁶foi considerado um valor médio de EIRP onde o valor de Ue já engloba o valor de um único elemento de antena, com isso na fórmula o valor de Gant_{SGNR} é considerado 0). Gant_{FSS} = FSS off axis antenna Gain em dBi.

$$MAPL_{c/margem} = Ue + Gant_{5GNR} + Gant_{FSS} - Nfloor + margem$$
 Equação 9

Onde:

MAPL_{c/margem} = Maximum Available Path Loss mais margem em dB. margem = margem adicional (tilt, azimute, etc) em dB.

$$D_{FSPL} = 10^{MAPL - (32,44 + 20\log 10(f))/20}$$
 Equação 10

Onde:

D_{FSPL}= distância em km, caso Free Space Loss. f = frequency em MHz.

²⁶ De acordo com a Rec. ITU-R M.2101-0 o sinal indesejável, causado pela modulação OOB do transmissor, os produtos de intermodulação e componentes de emissão espúrios não terão a mesma situação correlacionada da antena e assim terá um padrão de emissão diferente e, portanto, um ganho menor do que o da antena para o sinal desejado. O AAS não correlacionado possui um padrão de emissão de antena semelhante a um único elemento de antena.

Caso sinal IMT adjacente à faixa FSS:

$$EIRP_{total} = Pot_{maxpol} + Gant_{5GNR} + 3 dB$$
 Equação 11

Onde:

$$\begin{split} \mathsf{EIRP}_{\mathsf{total}} &= \textit{Maximum EIRP em dBm}.\\ \mathsf{Pot}_{\mathsf{maxpol}} &= \textit{Maximum power per polarization em dBm}.\\ \mathsf{Gant}_{\mathsf{5GNR}} &= \mathit{5G NR antenna Gain em dBi}. \end{split}$$

 $MAPL = EIRP_{total} + Gant_{FSS} - LNB_{maxoplev}$ Equação 12

Onde:

MAPL = Maximum Available Path Loss em dB. Gant_{FSS} = FSS off axis antenna Gain em dBi. LNB_{maxoplev} = LNB max operating level em dBm.

$$MAPL_{c/margem} = EIRP_{total} + Gant_{FSS} - LNB_{maxoplev} + margem$$
 Equação 13

Onde:

MAPL_{c/margem} = Maximum Available Path Loss em dB mais margem em dB. Gant_{FSS} = FSS off axis antenna Gain em dBi. LNB_{maxoplev} = LNB max operating level em dBm. margem = margem adicional (tilt, azimute, etc) em dB.

$$MAPL_{c/IRF@X MHz} = EIRP_{total} + Gant_{FSS} - LNB_{maxoplev} + IRF@X MHz$$

Equação 14

Onde:

MAPL_{c/IRF@X MHz} = Maximum Available Path Loss mais margem em dB. IRF@X MHz = IRF em dB @X MHz de espaçamento de frequência mais alta do IMT.

$$D_{FSPL} = 10^{MAPL - (32,44 + 20\log 10(f))/20}$$

Equação 15

Onde:

D_{FSPL}= distância em km, caso Free Space Loss. f = frequency em MHz.

Caso modelo de propagação utilizado no artigo "Coexistence Conditions of LTE-Advanced at 3400-3600 MHz with TVRO at 3625-4200 MHz in Brazil"²⁷:

$$PL = \begin{cases} FSPL + X_{\sigma} \ d < 0.04 \\ FSPL + \frac{d - 0.04}{10dk - 0.004} A_h + X_{\sigma} \ 0.04 \le d < 10dk \\ FSPL + A_h + X_{\sigma} \ d \ge 10dk \end{cases}$$
 Equação 16

Onde:

PL = Path Loss em dB. FSPL = Free Space Loss em dB. dk = distance from nominal cluter point em km.

²⁷ Coexistence Conditions of LTE-Advanced at 3400-3600 MHz with TVRO at 3625-4200 MHz in Brazil, Fernandes, Leandro Carísio; Linhares, Agostinho. Wireless Networks magazine – Springer, 2017.

 $X_{\sigma} = X_{\sigma} \acute{e}$ uma variável Gaussiana com media zero e desvio padrão σ (suburban =8 dB, urban = 6 dB). X_{σ} modelo um desvanescimento lento (slow fading) em dB. A_h= Additiononal Clutter Loss em dB.

$$FSPL = 32.44 + 20log10(f) + 20log10(d)$$
 Equação 17

FSPL = Free Space Loss em dB. d= distância em km. f = frequency em MHz.

$$A_{h} = 10.25F_{fc}e^{-dk}\left\{1 - tanh\left[6\left(\frac{h}{ha} - 0.625\right)\right]\right\} - 0.33$$
 Equação 18

Onde:

A_h = Additiononal Clutter Loss em dB.
dk = distance from nominal cluter point em km.
h = receiver antenna height em m (TVRO = 6m).
ha = clutter height em m (suburban =25m, urban = 20).

$$F_{fch} = 0.25 + 0.375\{1 + tanh[7.5(f_{GHz} - 0.625)]\}$$
 Equação 19

