

Estudos de Convivência entre IMT-2020 e TVRO: Simulações

Maio/2020 Versão 1.0

Elaborado por:

Alexandre Moraes, Dr.

Agostinho Linhares, Dr.

Edgar Souza, M.Sc.

Marcelo Tapajós, M.Sc.

Frederico Neves, M.Sc.

Alex Pires, M.Sc.

Sumário

.....	1
Introdução	3
Metodologia	3
Método de Monte Carlo.....	3
Características dos Sistemas	4
Sistema IMT.....	4
Sistema TVRO	7
Resultados	9
Conclusão	12
Referências Bibliográficas	13

Introdução

Este estudo apresenta a avaliação e condições de convivência entre sistemas 5G e TVRO (*Television Reception Only*) operando em faixas adjacentes da banda C. Esta investigação utiliza o método de Monte Carlo para avaliar a probabilidade de que a interferência agregada das diversas estações 5G possa causar saturação¹ na recepção do LNBF (*Low-noise block feeder*) da estação TVRO, sendo que considera como entrada parâmetros apresentados como viáveis nas discussões sobre o desenvolvimento de LNBs otimizados (ex.: ponto de compressão P1dB (entrada) ≥ -25 dBm).

Os principais mecanismos de interferência do 5G na recepção da TVRO operando na banda C são: (1) saturação do LNBF; e (2) emissões indesejáveis do 5G. Com a proposta² de 100 MHz de faixa de guarda entre a operação do 5G (3.300 – 3.700 MHz) e a operação da TVRO (3.800 – 4.200 MHz), considera-se que as emissões indesejáveis do 5G não ocasionarão interferências prejudiciais na recepção da TVRO.

O tema já foi objeto de extensa discussão no âmbito da Anatel. O leitor pode recorrer ao “[Relatório dos testes de convivência entre o IMT operando na faixa de 3,5 GHz e sistemas satelitais operando em faixa adjacente](#)” para uma contextualização mais pormenorizada do tema [1]. No âmbito acadêmico-científico, o tema da convivência de sistemas IMT (no caso, IMT-Advanced) com TVRO também conta com estudo anterior confeccionado na Agência e publicado em revista científica especializada [2] após avaliação por pares.

Metodologia

A metodologia adotada segue as melhores práticas internacionais, pois utiliza Recomendações e Relatórios da União Internacional de Telecomunicações (UIT), que estão implementadas no *software* SHARC. Este *software* foi desenvolvido na Gerência de Espectro, Órbita e Radiodifusão da Anatel, com a colaboração de representantes da indústria e da academia, tendo sido amplamente utilizado em estudos anteriores que foram apresentados no Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (UIT-R), revistas especializadas e congressos científicos. Essa ferramenta de simulação em código aberto dá suporte a estudos de compartilhamento e compatibilidade entre sistemas IMT e outros serviços de radiocomunicações de acordo com o arcabouço proposto pela Recomendação UIT-R M.2101.

O SHARC é um simulador estático baseado no método de Monte Carlo e dispõe de diversas funcionalidades comumente empregadas nos sistemas de telecomunicações mais recentes, tais como conformação de feixes em arranjo de antenas³, controle de potência, alocação de blocos de recursos, entre outras. Foi desenvolvido com a linguagem de programação Python e seu código fonte está disponível em <https://github.com/SIMULATOR-WG/SHARC> [3].

Todos os parâmetros necessários para simulação e avaliação são apresentados neste trabalho, de tal forma que os resultados podem ser testados por outros interessados, utilizando a mesma ferramenta ou outra disponível, garantindo sua repetibilidade e reprodutibilidade. Além disso, como o código fonte é aberto, o software pode ser auditado.

Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é uma ferramenta computacional bastante utilizada em simulações de fenômenos físicos quando há uma série de variáveis aleatórias envolvidas que interagem entre si. Cada

¹ Neste trabalho, considera-se como saturação qualquer valor igual ou superior ao ponto de compressão P1dB, tendo como referência a entrada do dispositivo.

² Anatel - Consulta Pública Nº 9/2020. Processo nº 53500.046380/2018-91.

³ Também conhecido pelo termo em língua inglesa, *beamforming*.

elemento do fenômeno simulado é descrito por uma distribuição estatística que caracteriza adequadamente aquele elemento. A partir daí é realizada uma série de simulações (cada uma chamada de evento ou *snapshot*) no qual, em cada uma delas, são selecionados valores para as variáveis envolvidas de acordo com a sua distribuição estatística. No final desse processo, obtêm-se informações estatísticas sobre o fenômeno estudado.

Devido à natureza aleatória e iterativa desse processo, os resultados apresentados estão sujeitos a flutuações. Contudo, realizando um número suficientemente grande de ensaios, obtêm-se resultados com uma pequena margem de erro [4] [5] [6]. Em todos os casos apresentados neste documento, realizaram-se 8.000 *snapshots* no SHARC [6].

Características dos Sistemas

Apresentam-se, nesta seção, as principais características técnicas dos sistemas de telecomunicações sob estudo.

Na Figura 1, ilustra-se o cenário completo de simulação com o sistema TVRO posicionado aleatoriamente em algum ponto da região central (círculo azul), de tal forma a receber interferências provenientes de fontes localizadas em todas as células da figura, representadas pelos hexágonos. O sistema IMT é composto por macrocélulas dispostas em um arranjo hexagonal e por estações móveis cujas posições são sorteadas a cada iteração da simulação.

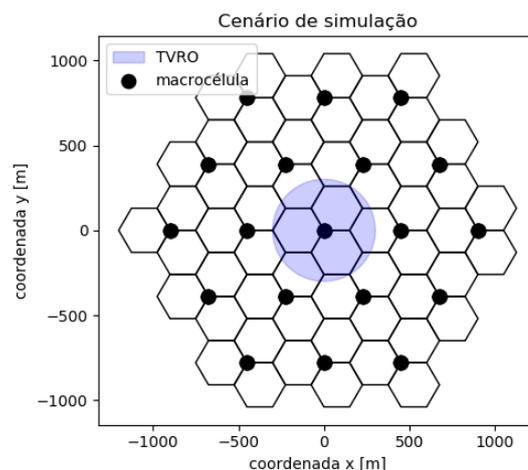


Figura 1 – Cenário de simulação.

A seguir expõem-se os parâmetros do sistema interferente (IMT) e do sistema interferido (TVRO).

Sistema IMT

Empregaram-se neste trabalho os cenários de macrocélula urbana e suburbana, compatíveis com os apresentados no *Report ITU-R M.2292 – “Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses”*. Nesta modelagem a potência de transmissão das estações base (BSs) é constante e limitada a valores propostos na regulamentação brasileira. Os usuários podem estar *indoor* ou *outdoor*. No caso de redes sem fio fixas (FWA – *Fixed Wireless Access*), os equipamentos das instalações do usuário (CPE – *Customer Premise Equipment*) estão localizadas somente em ambiente *indoor*, e seu modelamento é equivalente, porém com ajustes técnicos, aos equipamentos de usuários (UEs).

Conforme observa-se na Figura 2, as macrocélulas têm como parâmetros a distância entre sítios ISD (do inglês, *intersite distance*) e o raio R.

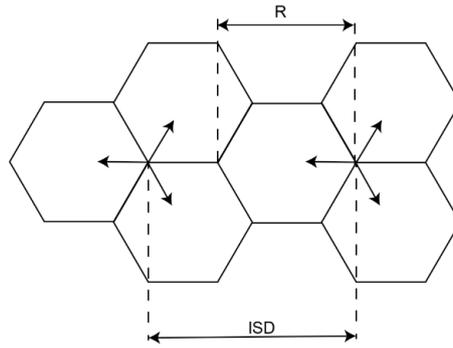


Figura 2 – Macrocélula.

São três os principais cenários de simulação: (1) Serviço móvel (*downlink*); (2) Serviço móvel (*uplink*); e (3) Acesso fixo sem fio (*uplink*). A Tabela 1 mostra as principais características dos cenários de serviço móvel analisados (tanto *downlink* quanto *uplink*).

Tabela 1 – Características dos sistemas interferentes (serviço móvel *downlink* e *uplink*).

Parâmetro	Serviço móvel			
Topologia do sistema	Macrocélula			
Número de <i>clusters</i>	1			
Fator de carga da BS	1			
UEs por célula	3			
Porcentagem de UEs indoor	70%			
Distribuição de UEs nas células	Uniforme			
Controle de potência do UE	Ativo			
Altura do UE	1,5 m			
Figura de ruído do UE	9 dB			
Perda corporal do UE	4 dB			
Potência máxima no UE (EIRP)	23 dBm			
Ganho máximo por elemento no UE	-4 dBi			
Número de antenas no UE	1			
Tipo de antena do UE	Omnidirecional			
EIRP (BS)	68 dBm			
Frequência Central de Operação	3.580 MHz			
Ambiente	Urbano		Suburbano	
ISD	450 m		900 m	
Altura da BS	20 m		25 m	
Antena da BS	M.2101	F.1336	M.2101	F.1336
Tipo de antena da BS	Beamforming	Setorial	Beamforming	Setorial
Ângulo de <i>downtilt</i> da BS	10°	10°	6°	6°
Perda ôhmica (antena beamforming) ou perda em cabos e conectores (antena setorial)	2 dB	3 dB	2 dB	3 dB
Pot. conduzida por elemento de antena na BS	26 dBm	53 dBm	26 dBm	53 dBm
Ganho máximo por elemento na BS	8 dBi	18 dBi	8 dBi	18 dBi
Número de antenas na BS	8 x 8	1	8 x 8	1

A

Tabela 2 descreve as principais características do sistema interferente (acesso fixo sem fio *uplink*).

Tabela 2 - Características do sistema interferente (acesso fixo sem fio uplink).

Parâmetro	Acesso fixo sem fio (Uplink)	
Topologia do sistema	Macro célula	
Ambiente	Suburbano	
Número de <i>clusters</i>	1	
ISD	1.500 m	
Fator de atividade da BS	1	
Altura da BS	25 m	
Ângulo de <i>downtilt</i> da BS	6°	
CPEs por célula	3	
Porcentagem de CPEs indoor	100%	
Distribuição de CPEs	Uniforme	
Controle de potência do CPE	Ativo	
Altura do CPE	1,5 m	
Figura de ruído do CPE	9 dB	
Perda corporal do CPE	0 dB	
Potência máxima no CPE	35 dBm	
Ganho máximo por elemento no CPE	8	
Número de antenas no CPE	1	
Tipo de antena do CPE	Fixa	
EIRP	68 dBm	
Tipo do UE	CPE	
Valor alvo de potência por bloco de recursos	-85 dBm	
Antena da BS	M.2101	F.1336
Tipo de antena da BS	<i>Beamforming</i>	Setorial
Perda ôhmica (antena <i>beamforming</i>) ou perda em cabos e conectores (antena setorial)	2 dB	3 dB
Potência conduzida por elemento de antena na BS	26 dBm	53 dBm
Ganho máximo por elemento na BS	8 dB	18 dB
Número de antenas na BS	8 x 8	1

Ressalta-se que cada BS é composta por três setores (ou células). Em cada uma dessas células, por sua vez, há três UEs ou CPEs transmitindo ou recebendo informação, em uma rede de duplexação por divisão de tempo (TDD) síncrona. Apresentam-se, na Figura 3, os diagramas de radiação das BSs IMT. Em azul, exibe-se o comportamento da antena com conformação de feixes, que segue a Recomendação UIT-R M.2101. Em vermelho, o diagrama da antena setorial conforme disposto na Recomendação UIT-R F.1336.

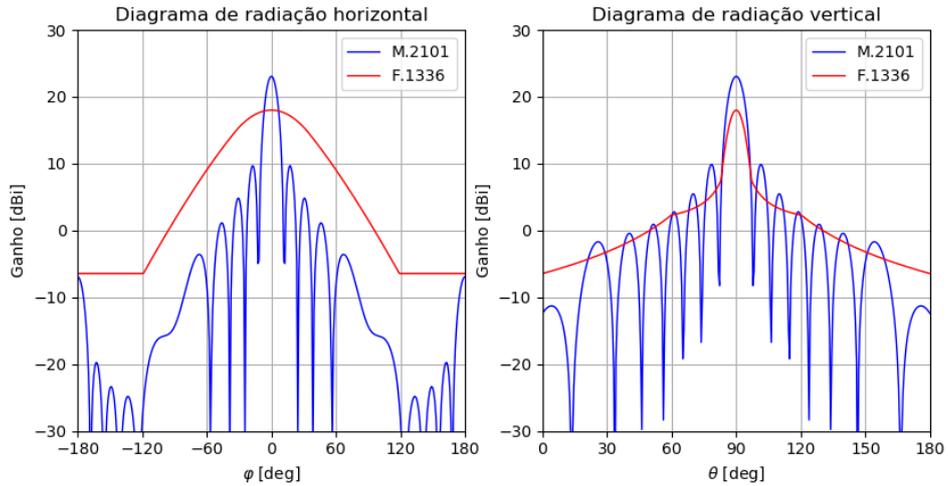


Figura 3 – Diagrama de radiação da BS IMT.

Sistema TVRO

A Tabela 3 exhibe as principais características do sistema interferido (TVRO).

Tabela 3 – Características do sistema interferido (TVRO).

Parâmetro	Valores
Seletividade de canal adjacente (filtro no LNBF, antes do 1º LNA)	0 dB / 5 dB / 10 dB / 15 dB / 20 dB / 25 dB / 30 dB
Altura da antena	6 m
Ganho de envoltória da antena	0 dBi / -4 dBi / -10 dBi
Elevação mínima/máxima	48° / 80°
Frequência de Operação	3.800 – 4.200 MHz
Diagrama da antena	UIT-R S.465 modificado
Diâmetro da antena	1,7 m
Discriminação de polarização (XPOL)	1,5 dB

Na Figura 4 consta o diagrama de radiação da antena do sistema interferido (TVRO). Consideram-se, neste estudo, três valores para o ganho de envoltória: 0 dBi, -4 dBi e -10 dBi.

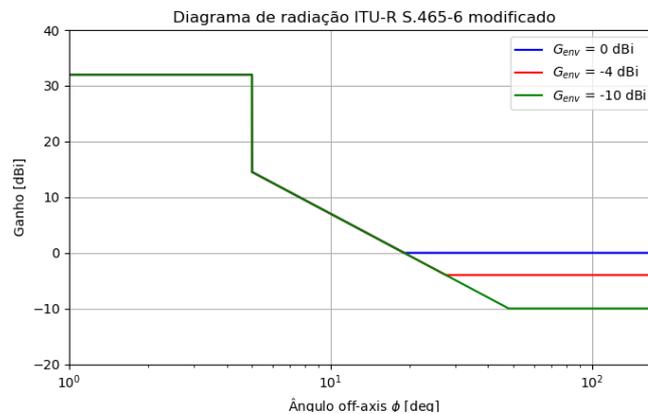


Figura 4 – Diagrama de radiação da antena parabólica do sistema TVRO.

Perdas por Propagação

A Figura 5 mostra o comportamento determinístico das perdas de propagação para os diferentes enlaces utilizados na simulação. Adicionalmente, considera-se um parâmetro aleatório (não mostrado na figura) para representar o desvanecimento lento.

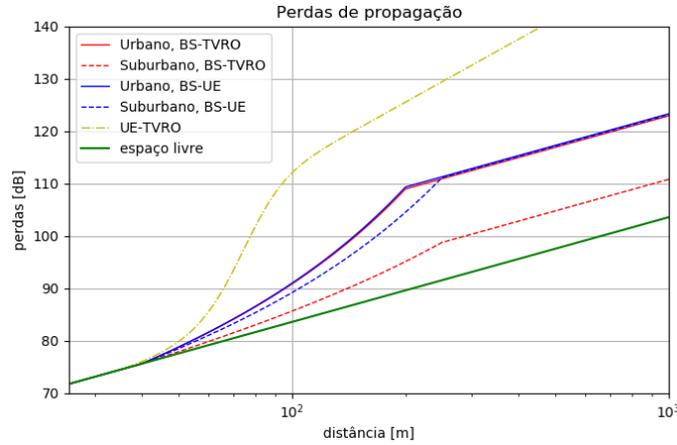


Figura 5 - Características das perdas por propagação.

As perdas de percurso no enlace BS-UE são representadas por:

$$PL(\text{dB}) = \begin{cases} FSPL + X_\sigma, & d < 0.04 \\ FSPL + \frac{d - 0.04}{10d_k - 0.04} A_h + X_\sigma, & 0.04 \leq d < 10d_k \\ FSPL + A_h + X_\sigma, & d \geq 10d_k \end{cases} \quad (1)$$

onde $FSPL = 92,44 + 20\log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20\log_{10}(d)$ é o modelo de perda de percurso em espaço livre, f_{GHz} é a frequência, d é a distância entre transmissor e receptor (em km) e X_σ é uma variável aleatória gaussiana de média zero e desvio padrão σ . X_σ modela o desvanecimento lento. A_h representa uma perda adicional de clutter⁴:

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

onde $F_{fc} = 0,25 + 0,375\{1 + \tanh[7,5(f_{\text{GHz}} - 0,5)]\}$, d_k é a distância do ponto de clutter nominal para a antena receptora (em km), h é a altura da antena receptora (em m) e h_a é a altura do clutter (em m). Para o ambiente suburbano, $h_a = 9\text{m}$ e $d_k = 0,025\text{km}$. Para o cenário urbano, $h_a = 20\text{m}$ e $d_k = 0,02\text{km}$. Neste modelamento, considera-se que a perda de percurso não pode ser menor do que a perda em espaço livre.

O modelo de propagação entre a UE IMT e a antena receptora TVRO é descrito por:

$$PL(\text{dB}) = PL_{LOS} \cdot p_{LOS}(d_m) + PL_{NLOS} \cdot [1 - p_{LOS}(d_m)] + X_{3,89},$$

⁴ Clutter refere-se a objetos, como edifícios ou vegetação, que estão na superfície da Terra, excluindo a variação no perfil do terreno.

onde $PL_{LOS} = 102,93 + 20\log_{10}(d)$, $PL_{NLOS} = 153,5 + 40\log_{10}(d)$, d é a distância entre transmissor e receptor (em km), d_m é a mesma distância (em m), $X_{3,89}$ é uma variável aleatória gaussiana com média zero e desvio padrão 3,89 dB. Ademais,

$$P_{LOS}(d_m) = \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[-0,1(d_m - 70)]} \right\}^{-1}.$$

Resultados

A Figura 6 apresenta o resumo das simulações, combinando os resultados para o ambiente urbano com o suburbano, para uma antena de TVRO com envoltória de -4 dBi. A linha tracejada indica o cenário urbano enquanto a linha contínua indica o cenário suburbano. Apresentam-se resultados para antena setorial (aderente à Recomendação UIT-R F. 1336) e para antena com conformação de feixes (aderente ao disposto na Recomendação UIT-R M.2101). Observam-se valores de interferência agregada superiores a -20 dBm, mas com baixíssima probabilidade. **Considerando que o modelamento do estudo de convivência é conservador, estima-se que em um ambiente equivalente ao simulado, para um LNBF com ponto de compressão (P1dB) igual ou superior a -30 dBm em toda a faixa de interesse, menos de 5% das TVROs poderiam ser interferidas no ambiente urbano e menos de 2% no ambiente suburbano, considerando as curvas para as antenas setoriais. Por outro lado, quando se utiliza antena *beamforming* somente 0,2% dos *snapshots* resultara em interferências prejudiciais para o ambiente urbano e menos de 0,1% para o ambiente suburbano.**

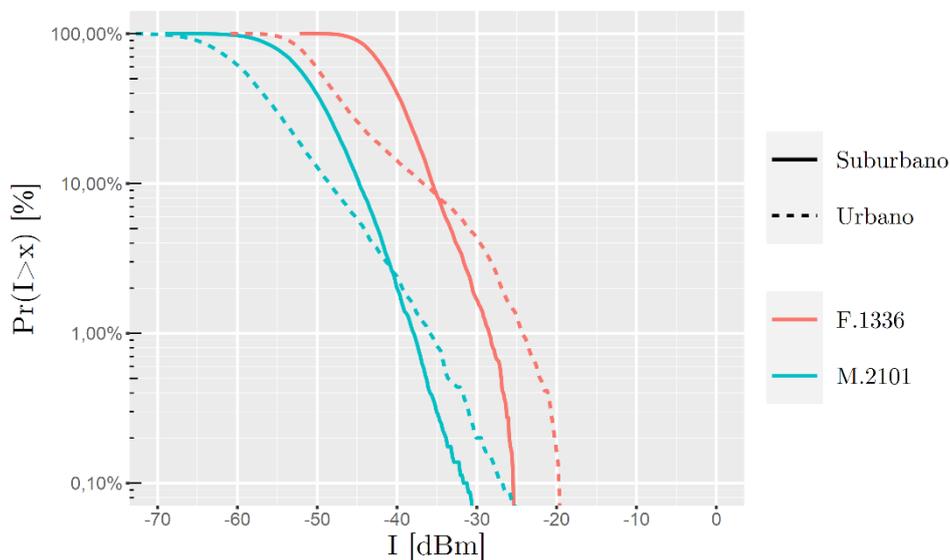


Figura 6 – Probabilidade de que a interferência do enlace direto seja maior que x , nos cenários urbano e suburbano, com antena setorial (UIT-R F.1336) ou com conformação de feixes (UIT-R M.2101), com ganho de envoltória de -4 dBi, com ângulo de elevação da estação terrena da TVRO de 48°.

A Figura 7, a seguir, ilustra resultados obtidos para o ambiente suburbano, com variados ganhos de envoltória no sistema interferido, com uso, pelo IMT, de antenas setoriais e de antenas com conformação de feixes. **Nota-se que, em aproximadamente 10% dos *snapshots* simulados, a interferência agregada percebida pelo sistema TVRO foi superior a -50 dBm, com ganho de**

envoltória de -10 dBi e antena com *beamforming*. Importante destacar que esse resultado não implica necessariamente que 10% dos usuários serão afetados pela interferência em 100% do tempo, nem que 100% dos usuários serão afetados em 10% do tempo, mas indica que a interferência potencialmente ocorrerá em algum valor intermediário combinando percentual de tempo e usuários.

Por outro lado, analisando a mesma Figura 7, para a antena setorial do lado do 5G e envoltória de -10 dBi do lado da TVRO, a probabilidade do nível agregado de interferência ser superior a -50 dBm é de aproximadamente 80%. Nesse caso de antena setorial, como a contribuição das UEs na interferência agregada é muito pequena, pode-se interpretar esses resultados de eventos de interferências prejudiciais como sendo independentes do tempo, isto é, se a probabilidade de ultrapassar um determinado valor de saturação é X%, então estima-se que X% das TVROs poderia ser continuamente afetada. Essa diferença entre antena *beamforming* e antena setorial se dá devido ao apontamento dinâmico nas antenas com conformação de feixe, que faz com que em cada *snapshot* se tenha enlaces ponto a ponto (bem diretivos) entre BS e UE, enquanto que para antena setorial, esta radia em todas as direções dentro do setor, mesmo que não tenha usuário, aumentando as chances de interferências contínuas. Por isso, para o caso em tela, sugere-se a avaliação combinada dos resultados para os dois tipos de antena, isto é, setorial e com conformação de feixes.

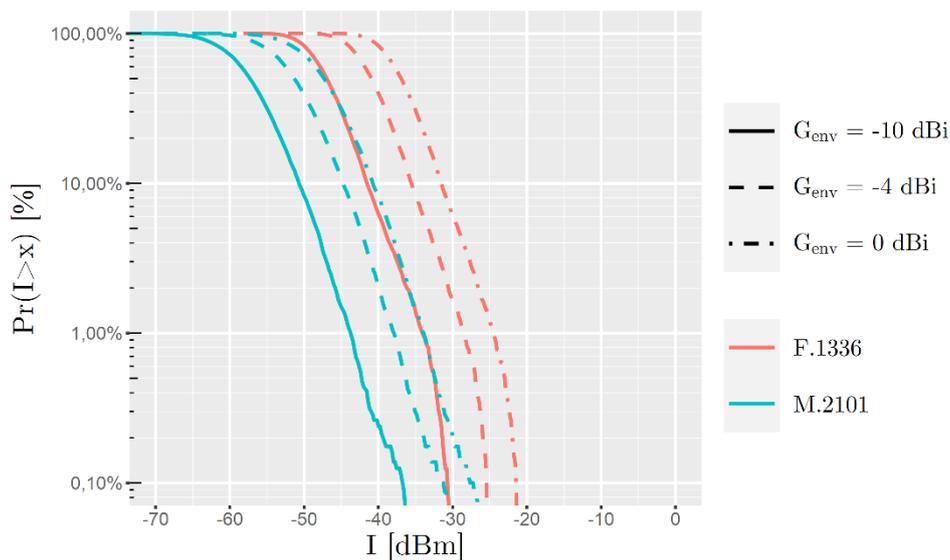


Figura 7 – Probabilidade de que a interferência do enlace direto seja maior que x , no cenário suburbano, com antena setorial (UIT-R F.1336) ou com conformação de feixes (UIT-R M.2101), para diferentes ganhos de envoltória, com ângulo de elevação da estação terrena da TVRO de 48°.

A Figura 8 ilustra o caso de ambiente urbano. Comparativamente, nota-se que, em aproximadamente 6% dos *snapshots* simulados, a interferência agregada percebida pelo sistema TVRO foi superior a -50 dBm, para ganho de envoltória igual a -10 dBi, com antena com conformação de feixes.

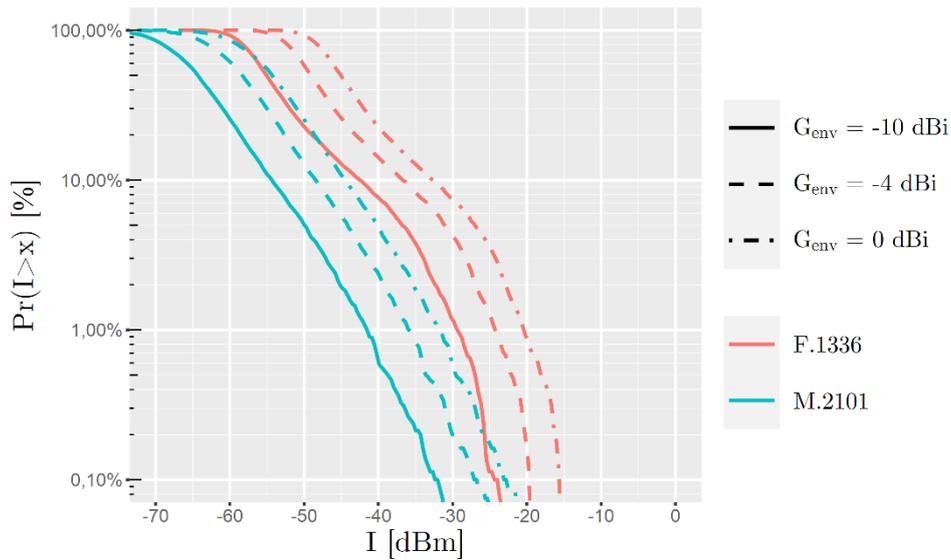


Figura 8 – Probabilidade de que a interferência do enlace direto seja maior que x , **no cenário urbano**, com antena setorial (UIT-R F.1336) ou com conformação de feixes (UIT-R M.2101), para diferentes ganhos de envoltória, com ângulo de elevação da estação terrena da TVRO de 48°.

Nas figuras anteriormente mencionadas, tratou-se sempre da interferência causada pelo enlace direto do IMT, ou seja, dos efeitos ocasionados pela radiação proveniente da BS do IMT em direção à antena parabólica do sistema TVRO. Em oposição, na Figura 9 e na Figura 10, estudam-se os efeitos deletérios causados no sistema TVRO em decorrência da energia radiada pelo UE do IMT. Primeiramente, na Figura 9, trata-se de um terminal móvel padrão (*handheld*). Posteriormente, na Figura 10, ilustra-se o cenário com um CPE compatível com o serviço fixo sem fio (FWA, na sigla em inglês).

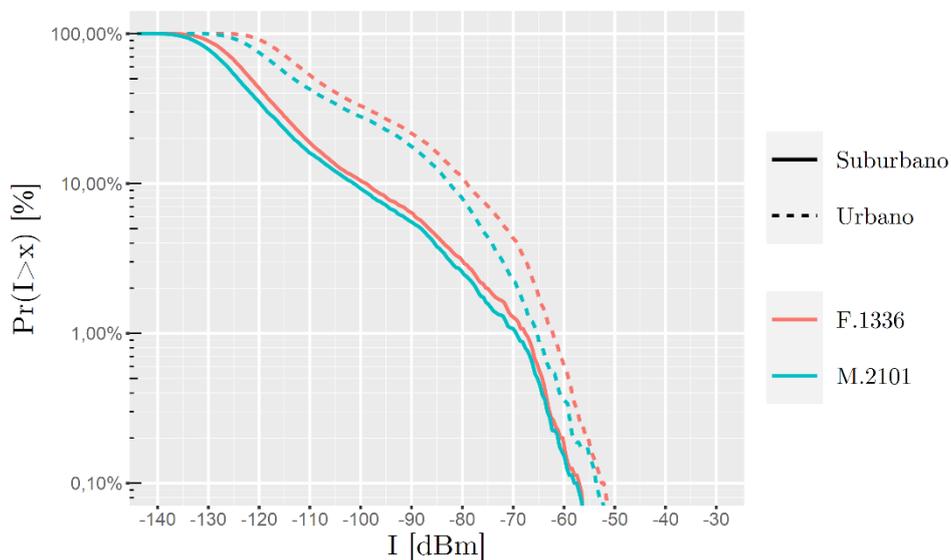


Figura 9 – Probabilidade de que a interferência **do enlace reverso** seja maior que x , nos cenários urbano e suburbano, com antena setorial (UIT-R F.1336) ou com conformação de feixes (UIT-R M.2101), com ganho de envoltória de 0 dBi, com ângulo de elevação da estação terrena da TVRO de 48°.

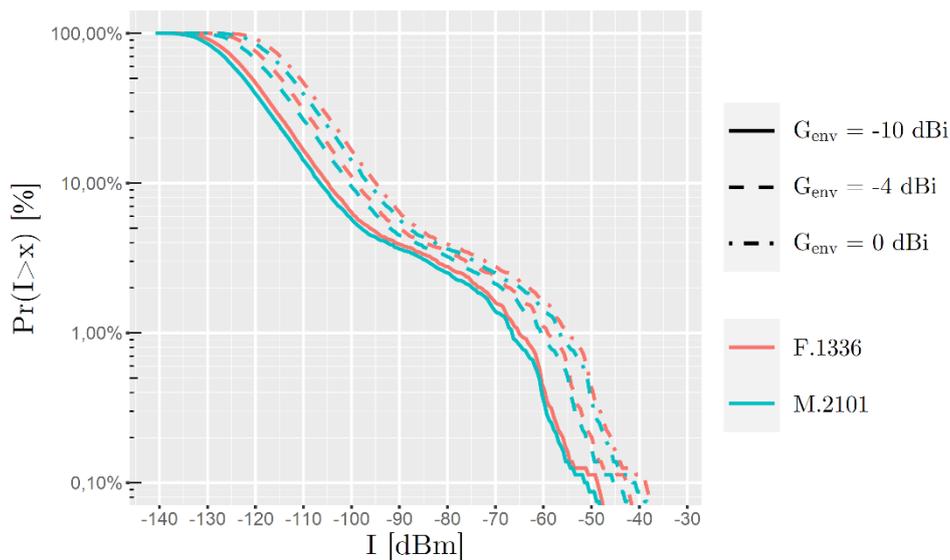


Figura 10 – Probabilidade de que a interferência do enlace reverso, **em um sistema FWA**, no cenário suburbano com antena setorial (UIT-R F.1336) ou com conformação de feixes (UIT-R M.2101), para diferentes ganhos de envoltória, com ângulo de elevação da estação terrena da TVRO de 48°.

Em ambos os casos, o fator mais determinante da interferência percebida pelo sistema TVRO é o *downlink* do IMT, de forma que se pode desconsiderar a interferência do *uplink*, em todos os casos, pois resolvendo o *downlink*, automaticamente, resolve-se o *uplink*.

Convém observar que, nestas simulações, os terminais móveis padrão (e também a CPE, no caso do FWA) estão sempre equipados com antenas que proporcionam ganhos fixos em todas as direções. No cenário em que as BSs estão equipadas com arranjos de antenas capazes de realizar a conformação de feixes, a interferência agregada gerada pelos terminais móveis é inferior àquela observada no cenário em que as BSs estão equipadas com antenas setoriais. No primeiro cenário, como a antena é diretiva e otimizada para apontar para o terminal do usuário, o ganho da antena é maior do que no caso da antena setorial. Logo, o algoritmo de controle de potência dos terminais móveis ajusta a potência de transmissão para níveis mais baixos de modo que o enlace de subida tenda a ter o mesmo desempenho em ambos os cenários (antena setorial e antena *beamforming*). Portanto, a diferença nos níveis de interferência agregada que se observa na Figura 9 e na Figura 10 é resultado da atuação do algoritmo de controle de potência dos terminais móveis.

Além dos resultados aqui registrados, simularam-se ainda os casos análogos em que o ângulo de elevação da estação terrena da TVRO é de 80°. Todavia, não se observaram diferenças significativas das curvas resultantes.

Conclusão

Os resultados das simulações sugerem que a convivência entre IMT-2020 e TVRO é possível se forem disponibilizados LNBs com ponto de compressão (P1dB) **não inferior a -30 dBm**⁵ na faixa de 3.300 – 3.700 MHz, sendo desejável valores mais robustos, como, p.ex., -25 dBm ou -20 dBm.

Não obstante os resultados das simulações serem conservadores, identificaram-se eventos de baixa probabilidade nos quais foram recebidos sinais superiores a -20 dBm, de tal forma que não se pode negar a possibilidade de interferência prejudicial mesmo com LNBs aperfeiçoados. **Nessas situações,**

⁵ Além do ponto de compressão P1dB (entrada), outros parâmetros devem ser definidos, como por exemplo, perda de inserção e/ou temperatura equivalente de ruído.

a proteção da TVRO pode ser tratada de forma pontual. Exemplos de técnicas de mitigação complementares incluem a definição de distâncias mínimas entre BS e estação TVRO, blindagem da TVRO, inclusive utilizando a estrutura já construída (ex. muros) para reposicionamento da antena parabólica, troca da antena parabólica, entre outras.

Os cenários simulados se baseiam em referências da UIT-R. Cenários representando cidades específicas ou locais específicos podem ter resultados diferentes. Todavia, **a conclusão geral permanece: 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.**

Feita essa análise, cumpre salientar que os resultados aqui apresentados não devem ser avaliados de forma isolada, mas em conjunto com os resultados observados em testes de campo e em outras análises teóricas elaboradas pela Anatel.

Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Telecomunicações, “Relatório dos Testes de Convivência entre o IMT Operando na Faixa de 3,5 GHz e Sistemas Satelitais Operando em Faixa Adjacente,” Brasília, 2019.
- [2] L. C. Fernandes e A. Linhares, “Coexistence conditions of LTE-advanced at 3400-3600 MHz with TVRO at 3625-4200 MHz in Brazil,” *Springer Wireless Networks*, 2017.
- [3] E. Souza, A. Linhares, C. Queiroz, L. Valle, U. Dias e A. Barreto, “An open source simulation tool for sharing and compatibility studies between 5G and other radiocommunication systems,” em *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Águas de Lindoia, 2017.
- [4] G. J. Hahn, “Sample Sizes for Monte Carlo Simulation,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 11, pp. 678-680, 1972.
- [5] Brasil, “Document 5-1/309-E: Sample Size of a Representatively Large Segment of the IMT Network,” em *UIT-R TG5.1*, Genebra, 2018.
- [6] Brasil, “Document 5-1/308-E: On the Convergence of Monte-Carlo Approach for Sharing and Compatibility Studies between IMT-2020 and Other Services,” em *UIT-R TG5.1*, Genebra, 2018.

