



Danielle Mendonça Okamoto

**Análise da Coexistência entre TV Digital e LTE
na Faixa de 700 MHz - Medidas e Simulações**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof^o. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Coorientadora: Dr^a. Marta Pudwell Chaves de Almeida

Rio de Janeiro
Março de 2016



Danielle Mendonça Okamoto

**Análise da Coexistência entre TV Digital e LTE
na Faixa de 700 MHz - Medidas e Simulações**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profº. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Drª. Marta Pudwell Chaves de Almeida

Coorientadora

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Profª. Leni Joaquim de Matos

Universidade Federal Fluminense – UFF

Profº. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Universidade Federal do Pará – UFPA

Profº. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Profº. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Profº. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de Março de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Danielle Mendonça Okamoto

Em 2006, graduou-se em Engenharia de Telecomunicações na Universidade FUMEC. Em 2010, recebeu o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais na área de concentração de Sistemas de Computação e Telecomunicações.

Ficha Catalográfica

Okamoto, Danielle Mendonça

Análise da Coexistência entre TV Digital e LTE na Faixa de 700 MHz - Medidas e Simulações / Danielle Mendonça Okamoto ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello ; coorientadora: Marta Pudwell Chaves de Almeida. — 2016.

197 f. : il. (color) ; 30 cm

Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. LTE. 3. TV Digital. 4. ISDB-TB. 5. Campanha de medições de interferência. 6. Software SEAMCAT. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Almeida, Marta Pudwell Chaves de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais.

Agradecimentos

Concluir a tese foi a maior de minhas conquistas, superei meus próprios limites, enfrentei grandes obstáculos e, principalmente, aprendi com todos os percalços que a vida me apresentou. É tempo de comemorar este momento e também de agradecer porque uma batalha tão grandiosa não se vence sozinho.

Aos meus orientadores, Prof^o. Luiz da Silva Mello e Dr^a. Marta Pudwell, por todo ensinamento, entusiasmo, parceria e por toda confiança depositada em meu trabalho. Nossa parceria foi essencial para tornar essa árdua jornada um pouco mais leve e prazerosa. Encontrei em vocês a profissional que quero me tornar, por isso, terão sempre meus olhos de admiração e respeito. Imensamente grata.

Aos professores que acompanharam as várias etapas desse percurso, proporcionando o conhecimento que foi alicerce para meus estudos. O conhecimento ofertado por vocês, mestres, me tornou mais preparada para enfrentar os desafios que a pesquisa impõe e imporá. Sou muita grata aos professores da banca que se dispuseram a ler o meu trabalho e a deixar suas considerações e sugestões. Vocês enriqueceram estas páginas e abrilhantaram o dia da defesa.

Ao INMETRO, pela oportunidade de trabalhar em equipe, pela experiência profissional e pela disponibilização dos equipamentos para a realização das medições.

Aos meus amados pais que acreditaram que eu poderia voar mais alto e além. A batalha foi vencida porque vocês sempre estiveram ao meu lado, mesmo distantes, eu sentia a vibração e a torcida de vocês. Obrigada por permitirem que eu voasse tão longe. Essa vitória é nossa.

Ao Gustavo, amor que a vida me presenteou. Agradeço imensamente por todo apoio, carinho, cuidado e paciência dispendidos ao longo destes anos. Você acompanhou todas as etapas, viu meus limites e frustrações, vibrou por cada conquista e me colocou de pé todas as vezes que me faltavam forças para seguir adiante. Mesmo separados geograficamente, você esteve muito presente e foi o meu refúgio nos momentos mais insanos da vida. Meu agradecimento mais profundo.

À Chris, à Nina e à Raquel, por me mostrarem que a vida pode ser mais leve mesmo durante o doutorado. Muito obrigada pela parceria e todos os momentos de alegria e confidências.

Aos amigos Bruno Leandro Campos de Miranda, Rafael Abrantes Penchel e Rodrigo Borges de Queiroz, pelos 15 anos de amizade e por todas as conversas informais sobre LTE e TV Digital.

Aos amigos do CETUC, em especial, Juliana Carvalho e Ilídio Ferreira, por compartilharem minhas angústias, alegrias e vitórias. Obrigada pelo apoio e pelo ombro amigo. Aos funcionários, por tornarem o ambiente de trabalho mais organizado e por resolverem as pendências acadêmicas dos alunos, em especial, Marcelo Balisteri, Rogério Silva e Maria Alcina Portes. À querida Ana Beatriz por cuidar tão bem dos nossos livros. Obrigada por fazerem com que tudo funcionasse da melhor forma possível.

Special thanks to SEAMCAT group, in particular, Jean-Philippe Kermoal. Thank you for your attention and availability to solve my issues.

Ao CNPq/PROMETRO e à Capes, pelo apoio financeiro que foi essencial para que este trabalho se tornasse real.

Resumo

Okamoto, Danielle Mendonça; Mello, Luiz Alencar Reis da Silva; Almeida, Marta Pudwell Chaves de. **Análise da Coexistência entre TV Digital e LTE na Faixa de 700 MHz - Medidas e Simulações**. Rio de Janeiro, 2016. 197p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos com simulações computacionais de interferência entre sistemas LTE e TV Digital na faixa de 700 MHz e de medições de campo. Os resultados da campanha de medições foram usados para validar uma ferramenta de simulação que permite a avaliação de interferência entre os sistemas SBTVD e LTE em diferentes cenários. A ferramenta foi, então, utilizada para analisar a probabilidade de interferência que depende da distância entre os sistemas, da potência de transmissão, do número de interferentes e outros parâmetros que permitem definir as condições para a coexistência harmoniosa dos sistemas. A partir da validação da ferramenta, cenários de interferência com múltiplos receptores LTE e DTV foram simulados, com o propósito de reproduzir problemas mais realistas. Na última etapa do trabalho, como estudo de caso, foi realizada uma avaliação de interferência do sistema LTE nos receptores de TV Digital em cenário representativo da região da zona sul do município do Rio de Janeiro.

Palavras-chave

Dividendo digital; medições de interferência; simulação de interferência; SEAMCAT; LTE; ISDB-T_B; TV Digital.

Abstract

Okamoto, Danielle Mendonça; Mello, Luiz Alencar Reis da Silva (Advisor); Almeida, Marta Pudwell Chaves de (Co-advisor). **Analysis of the Coexistence between Digital TV and LTE in the 700 MHz Band - Measurements and Simulations**. Rio de Janeiro, 2016. 197p. PhD Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the results of computer simulations of the interference between LTE system and ISDB-T_B Digital TV system in the 700 MHz band and field measurements. The results of the measurement campaign were used to validate a simulation tool that runs different scenarios between the SBTVD systems and LTE. The software tool was used to analyze the probability of interference and its dependence on the distance between systems, transmission power, number of interferers and other parameters, aiming to estimate the conditions for the coexistence of the systems. Once the software tool was validated, different interference scenarios with multiple LTE and DTV receivers were analyzed, in order to reproduce more realistic problems. In the last part of this study, an interference evaluation from LTE system on Digital TV receivers was performed in the scenario which represents a region within the South Zone of the city of Rio de Janeiro.

Keywords

Digital dividend; interference measurements; interference simulation; SEAMCAT; LTE; ISDB-T_B; Digital TV.

Sumário

1 Introdução	24
1.1. Contexto.....	29
1.2. Relevância	32
1.3. Organização do texto	35
2 Trabalhos anteriores	37
2.1. Trabalhos da ANATEL	37
2.2. Trabalhos da Universidade Mackenzie	40
2.3. Trabalhos da UFPA	43
2.4. Trabalhos do GSMA	46
3 Campanha de medições	49
3.1. Cenários de interferência entre sistemas de TV Digital e LTE	50
3.2. Descrição do sistema de medição	51
3.2.1. Sistema de medição de interferência LTE na TV Digital.....	55
3.2.2. Sistema de medição de interferência TV Digital em LTE	58
3.3. Metodologia de testes	60
3.4. Medidas de interferência do sistema LTE na TV Digital.....	61
3.4.1. Testes de interferência do LTE na TV Digital.....	61
3.5. Medidas de interferência do sistema de TV Digital em LTE	67
3.5.1. Testes de interferência da TV Digital no LTE.....	67
4 Validação do uso do simulador SEAMCAT	72
4.1. O simulador de interferência (SEAMCAT)	72
4.2. Análise da interferência usando o SEAMCAT.....	74
4.3. Resultados da simulação da interferência do LTE na TV Digital	80

4.3.1. Metodologia para o cálculo das máscaras de transmissão.....	81
4.3.2. Comparação entre os resultados medidos e simulados	85
4.3.3. Resultados simulados da probabilidade de interferência	95
5 Simulação da interferência TV Digital-LTE em 700 MHz	99
5.1. Interferência do LTE nos receptores de TV Digital	99
5.2. Interferência da TV Digital no LTE	116
5.2.1. Interferência da TV Digital no <i>uplink</i> do sistema LTE	116
5.2.2. Interferência da TV Digital no <i>downlink</i> do sistema LTE	127
6 Estudo de caso	132
6.1. Descrição do cenário	132
6.1.1. Disposição dos sistemas LTE e TV Digital.....	133
6.1.2. Potência do transmissor de TV	134
6.1.3. Filtros dos receptores de TV	136
6.1.4. Parâmetros do sistema LTE.....	139
6.2. Resultados da simulação da interferência do sistema LTE na TV Digital na zona sul do Rio de Janeiro	140
6.2.1. Caso I.....	140
6.2.2. Caso II.....	142
6.2.3. Caso III.....	144
6.2.4. Caso IV	146
7 Conclusões.....	150
Referências bibliográficas	155
Anexo A – Medidas do LTE na TV Digital	164
Anexo B – Medidas da TV Digital no LTE	179
Anexo C – Parâmetros de simulação de interferência do LTE na DTV.....	184
Anexo D – Parâmetros de simulação de interferência da DTV no LTE.....	188

Anexo E – Gráficos da função de distribuição cumulativa e da densidade de probabilidade	193
--	------------

Lista de figuras

Figura 1.1: Representação da ocupação espectral na região de São Paulo: (a) sinais analógicos e digitais, (b) apenas sinais digitais [17] [19]	30
Figura 2.1: Cenários de interferência da BS no receptor de TV Digital [8]	42
Figura 2.2: Cenários de interferência do U.E. no receptor de TV Digital [8]	42
Figura 3.1: Plano de espectro do dividendo digital [35]	50
Figura 3.2: Vista aérea do pátio do INMETRO (Google Earth)	52
Figura 3.3: Vista aérea da posição dos equipamentos de medição de interferência LTE em TV Digital.....	52
Figura 3.4: Vista do estacionamento onde foram realizadas medições de interferência LTE no receptor de TV Digital	53
Figura 3.5: Gerador de sinal de TV Digital e amplificador RF	53
Figura 3.6: Posição dos elementos de ambos os sistemas.....	53
Figura 3.7: Vista aérea da posição dos equipamentos de medição de interferência TV Digital em LTE.....	54
Figura 3.8: Posição dos equipamentos de medição de interferência TV Digital em LTE	54
Figura 3.9: Posição das antenas transmissoras de sinais de TV Digital e de LTE.....	55
Figura 3.10: Antena do sistema LTE instalada no mastro da van	55
Figura 3.11: eNodeB localizado na parte interna da van	55
Figura 3.12: U.E. no interior da van	55
Figura 3.13: Setup de medição de interferência LTE em TV Digital (canal 51) com eNodeB e U.E. operando dentro da van.....	56

Figura 3.14: Setup de medição de interferência LTE em TV Digital (canais 49, 50 e 51) com eNodeB e U.E. operando fora da van.....	57
Figura 3.15: Setup de medição de interferência de TV Digital em LTE. O nível de sinal de TV é medido junto ao U.E. e eNodeB [12].....	58
Figura 3.16: Interferência do sistema de TV Digital no eNodeB e U.E. localizado no final do corredor do prédio 6 [12]	59
Figura 3.17: Interferência do sistema de TV Digital no U.E. e eNodeB localizado na rotatória [12]	59
Figura 3.18: Avaliação do nível de potência do sinal de TV Digital (modo one-seg) [12]	62
Figura 3.19: Avaliação do nível de potência do sinal de TV Digital (modo full-seg) [12].....	62
Figura 3.20: Posição do U.E. em frente à antena (1,5 m) [12].....	65
Figura 3.21: Interferência do sinal LTE no sistema de TV Digital [12]	65
Figura 3.22: Ponto de recepção do sinal LTE e medição dos parâmetros de uplink do U.E.....	68
Figura 3.23: Ponto de transmissão do sinal LTE	68
Figura 3.24: Pontos de transmissões dos sinais de TV Digital (antena vermelha) e LTE (antena branca)	69
Figura 3.25: U.E. na recepção do prédio	70
Figura 4.1: Link do sistema interferente, link interferente e link do sistema vítima [13].....	73
Figura 4.2: Níveis de sinais desejado e interferente	75
Figura 4.3: Interferência devido às emissões indesejadas do transmissor-interferente capturada pelo receptor-vítima [13]	76
Figura 4.4: Bloqueio do receptor-vítima [13]	77
Figura 4.5: Combinação dos dois mecanismos, emissões indesejadas e bloqueio do receptor, no SEAMCAT [13]	78
Figura 4.6: Interferência com ACLR e ACS limitados [13]	80

Figura 4.7: Exemplo de máscara de transmissão para eNodeB (LTE 5 MHz) no SEAMCAT com potência de transmissão de 39 dBm	82
Figura 4.8: Máscara de transmissão para eNodeB [43] associada com a metodologia de cálculo do 3GPP TS 36.104 [27]	82
Figura 4.9: Tabela de emissões espúrias do 3GPP TS 36.104 [27]	83
Figura 4.10: Espectro de transmissão do U.E. [26]	83
Figura 4.11: Tabela de emissões do 3GPP TS 36.101 [26]	84
Figura 4.12: Exemplo de máscara de transmissão para U.E. (LTE 5 MHz) no SEAMCAT com potência de transmissão de 23 dBm	84
Figura 4.13: Simulação do Teste 1 no SEAMCAT: apenas sistema de TV Digital canal 51 (modo full-seg) presente	85
Figura 4.14: Máscara de emissão do eNodeB usada no Teste 1	86
Figura 4.15: Resultados comparativos entre simulação e medida do Teste 1 para os canais (a) 49, (b) 50 e (c) 51	87
Figura 4.16: Resultados comparativos entre Teste 1 e Teste 2 para os canais (a) 49, (b) 50 e (c) 51	88
Figura 4.17: Resultado comparativo entre simulação e medida do Teste 3 para canal 51	89
Figura 4.18: Resultados comparativos entre Testes 1, 2 e 3	89
Figura 4.19: Simulação do Teste 4 no SEAMCAT: sistema de TV Digital canal 51 (modo full-seg) e sistema LTE (downlink e uplink) presentes	91
Figura 4.20: Resultado comparativo entre simulação e medida do Teste 4	91
Figura 4.21: Resultados comparativos entre simulação e medida do Teste 5 para os canais (a) 49 e (b) 50	92

Figura 4.22: Simulação do Teste 5 no SEAMCAT: sistema de TV Digital canal 51 (modo full-seg) e sistema LTE (downlink e uplink) presentes.	92
Figura 4.23: Simulação do Teste 6 no SEAMCAT: sistema de TV Digital canal 51 (modo full-seg) e sistema LTE (downlink e uplink) presentes.	93
Figura 4.24: Máscara de emissão do eNodeB usada no Teste 6	93
Figura 4.25: Resultado comparativo entre simulação e medida do Teste 6 para canal 51	94
Figura 4.26: Resultados comparativos entre Testes 6 e 7	95
Figura 4.27: IP (modo full-seg) entre Testes 2 e 3	96
Figura 4.28: IP (modo one-seg) entre Testes 2 e 3	96
Figura 4.29: IP (modo full-seg) entre Testes 4 e 5	97
Figura 4.30: IP (modo one-seg) entre Testes 4 e 5	97
Figura 4.31: IP (modo full-seg) nos Testes 5, 6 e 7	98
Figura 4.32: IP (modo one-seg) entre Testes 5, 6 e 7	98
Figura 5.1: Macro célula tri-setorizada com eNodeB posicionado no centro de cada célula	100
Figura 5.2: Cenário de simulação de interferência [5]	101
Figura 5.3: Máscaras de emissão dos equipamentos U.E. e eNodeB para banda de 10 MHz	103
Figura 5.4: Cenário de interferência com raio de cobertura de TV de 10 km	104
Figura 5.5: Vista ampliada da Figura 5.4	105
Figura 5.6: Curva de resposta do filtro LTE – Proeletronic [7]	106
Figura 5.7: Resultados da probabilidade de bloqueio (blocking) e da razão C/I do Cenário 1.1	107
Figura 5.8: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência do Cenário 1.1	108
Figura 5.9: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (blocking) e indesejada (unwanted) e da percentagem de eventos válidos do Cenário 1.1	109

Figura 5.10: Cenário de interferência com raio de cobertura de TV de 20 km	110
Figura 5.11: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência do Cenário 1.2	110
Figura 5.12: Resultados da probabilidade de bloqueio (blocking) e da razão C/I do Cenário 1.2	111
Figura 5.13: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (blocking) e indesejada (unwanted) e da percentagem de eventos válidos do Cenário 1.2	112
Figura 5.14: Máscara de transmissão do sistema de TV Digital [21]	117
Figura 5.15: Máscara de ACS do LTE UL.....	119
Figura 5.16: Estrutura da rede celular composta por 19 células tri-setorizadas com 21 usuários ativos.....	119
Figura 5.17: Capacidade do canal x SINR [57].....	120
Figura 5.18: Teste para determinar o número de eventos simulados.....	122
Figura 5.19: Teste para determinar o número de eventos simulados.....	122
Figura 5.20: Resultado da taxa de bit sem interferência por evento	123
Figura 5.21: Resultado da taxa de bit com interferência por evento	123
Figura 5.22: Resultado da capacidade do sistema com interferência: número de usuários ativos por evento	124
Figura 5.23: Resultado da razão SINR da vítima (eNodeB) por evento.....	124
Figura 5.24: Teste para determinar o número de eventos simulados.....	128
Figura 5.25: Cenário de interferência com raio de cobertura de TV de 20 km e raio da célula LTE de 2 km	128
Figura 6.1: Transmissores de sinal LTE posicionados na zona sul do município do Rio de Janeiro	132

Figura 6.2: Cenário de simulação de interferência na zona sul do município do Rio de Janeiro	134
Figura 6.3: Tela do SIGAnatel [60].....	136
Figura 6.4: Razão de proteção em função da frequência offset obtida pela Universidade Mackenzie [8].....	137
Figura 6.5: Curva de ACS calculada [8].....	138
Figura 6.6: Caso I: Resultados da probabilidade de bloqueio (blocking) e da razão C/I	141
Figura 6.7: Caso I: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (blocking) e indesejada (unwanted) e da probabilidade de eventos válidos	142
Figura 6.8: Caso I: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência	142
Figura 6.9: Caso II: Resultados da probabilidade de bloqueio (blocking) e da razão C/I	143
Figura 6.10: Caso II: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (blocking) e indesejada (unwanted) e da probabilidade de eventos válidos	144
Figura 6.11: Caso II: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência	144
Figura 6.12: Caso III: Resultados da probabilidade de bloqueio (blocking) e da razão C/I	145
Figura 6.13: Caso III: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (blocking) e indesejada (unwanted) e da probabilidade de eventos válidos	146
Figura 6.14: Caso III: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência	146
Figura 6.15: Caso IV: Resultados da probabilidade de bloqueio (blocking) e da razão C/I	147
Figura 6.16: Caso IV: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (blocking) e indesejada (unwanted) e da probabilidade de eventos válidos	148
Figura 6.17: Caso IV: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência	148

Lista de tabelas

Tabela 1.1: Canalização para TV Digital na faixa de VHF [20]	31
Tabela 1.2: Canalização para TV Digital na faixa de UHF [20]	31
Tabela 2.1: Resultados da probabilidade de interferência provocada pelo LTE, operando com 20 MHz de largura de banda na TV Digital [10]	44
Tabela 2.2: Resultados da perda da capacidade do sistema LTE provocada pela TV Digital (Classes Especial, A, B e C) [10]	45
Tabela 2.3: Resultados do modelamento para avaliar a coexistência dos sistemas de TV e LTE realizados pelo GSM [35]	47
Tabela 3.1: Cenários de interferências para avaliar a coexistência dos sistemas LTE e TV Digital	51
Tabela 3.2: Planejamento dos testes de interferência LTE na DTV	57
Tabela 3.3: Planejamento dos testes de interferência DTV no LTE	60
Tabela 3.4: Resumo dos testes realizados na medição	61
Tabela 3.5: Medidas obtidas nos canais 49, 50 e 51 referentes ao Teste 1	62
Tabela 3.6: Medidas obtidas nos canais 49, 50 e 51 referentes ao Teste 2	63
Tabela 3.7: Medidas obtidas no canal 51 referentes ao Teste 3	64
Tabela 3.8: Medidas obtidas no canal 51 referentes ao Teste 4	64
Tabela 3.9: Medidas obtidas nos canais 49, 50 e 51 referentes ao Teste 5	66
Tabela 3.10: Medidas obtidas no canal 51 referentes ao Teste 6	66

Tabela 3.11: Medidas obtidas no canal 51 referente ao Teste 7	67
Tabela 3.12: Parâmetros do sinal LTE do Teste 1	68
Tabela 3.13: Parâmetros do sinal LTE do Teste 3.....	70
Tabela 4.1: Teste 1: valores desejado (dRSS) e interferente (iRSS) calculados pelo SEAMCAT	90
Tabela 4.2: Teste 2: valores desejado (dRSS) e interferente (iRSS) calculados pelo SEAMCAT	90
Tabela 4.3: Teste 3: valores desejado (dRSS) e interferente (iRSS) calculados pelo SEAMCAT	90
Tabela 5.1: Resultados do leilão da faixa de 700 MHz [47]	102
Tabela 5.2: Canalização do espectro após o leilão.....	102
Tabela 5.3: Resultados de IP total dos Cenários 1.1 e 1.2	111
Tabela 5.4: Resultados da razão C/I dos Cenários 1.1 e 1.2.....	111
Tabela 5.5: Resultados comparativos da percentagem de eventos dos Cenários 1.1 e 1.2 [46]	112
Tabela 5.6: Resultados comparativos de IP total dos Cenários 1.1 e 2.1.....	113
Tabela 5.7: Resultados comparativos da razão C/I dos Cenários 1.1 e 2.1.....	113
Tabela 5.8: Resultados comparativos da percentagem de eventos dos Cenários 1.1 e 2.1	113
Tabela 5.9: Resultados comparativos de IP total dos Cenários 1.2 e 2.2.....	113
Tabela 5.10: Resultados comparativos da razão C/I dos Cenários 1.2 e 2.2.....	113
Tabela 5.11: Resultados comparativos da percentagem de eventos dos Cenários 1.2 e 2.2	114
Tabela 5.12: Mitigação de interferência do Cenário 1.1 com redução da potência do eNodeB [46].....	115
Tabela 5.13: Mitigação de interferência para o Cenário 1.1 com redução da potência do U.E. [46].....	115
Tabela 5.14: Mitigação de interferência do Cenário 1.2 com redução da potência do U.E. e aumento da EIRP TV	116

Tabela 5.15: Característica das classes de TV Digital [21].....	117
Tabela 5.16: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE uplink com raio da célula = 0,5 km [46].....	125
Tabela 5.17: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE uplink com raio da célula = 2 km [46].....	125
Tabela 5.18: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE uplink com raio da célula = 3 km.....	126
Tabela 5.19: Cenário 2: Valores médios obtidos no sistema LTE uplink com raio da célula = 2 km.....	126
Tabela 5.20: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE downlink com raio da célula = 0,5 km	129
Tabela 5.21: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE downlink com raio da célula = 2 km	129
Tabela 5.22: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE downlink com raio da célula = 3 km	130
Tabela 5.23: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE downlink com raio da célula = 5 km	130
Tabela 5.24: Cenário 2: Valores médios obtidos no sistema LTE downlink com raio da célula = 2 km	131
Tabela 6.1: Razão de proteção co-canal e valores de ACLR do LTE medidos pela Universidade Mackenzie [8] [36]	138
Tabela 6.2: Parâmetros de entrada do sistema de TV Digital no Seamcat.....	138
Tabela 6.3: Parâmetros do sistema interferente LTE uplink	139
Tabela 6.4: Parâmetros do sistema interferente LTE downlink.....	140
Tabela 6.5: Parâmetros de entrada do Caso I	141
Tabela 6.6: Parâmetros de entrada do Caso II	143
Tabela 6.7: Parâmetros de entrada do Caso III	145
Tabela 6.8: Parâmetros de entrada do Caso IV.....	147
Tabela 6.9: Parâmetros para convívio harmonioso entre os sistemas.....	149

Lista de siglas e abreviações

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Fourth Generation</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACIR	<i>Adjacent Channel Interference Ratio</i>
ACLR	<i>Adjacent Channel Leakage Ratio</i>
ACS	<i>Adjacent Channel Selectivity</i>
APT	<i>Asia-Pacific Telecommunity</i>
BS	<i>Base Station</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
CAG	Controle Automático de Ganho
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
dRSS	<i>desired Received Signal Strength</i>
DTV	<i>Digital Television</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
EGE	<i>Event Generation Engine</i>
EIRP	<i>Effective Isotropically Radiated Power</i>
eNodeB	<i>enhanced NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ERB	Estação Rádio-Base
ERP	<i>Effective Radiated Power</i>
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GSMA	<i>Groupe Speciale Mobile Association</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
ICE	<i>Interference Calculation Engine</i>

IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IP	<i>Interference Probability'</i>
iRSS	<i>interfering Received Signal Strength</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE DL	<i>LTE downlink</i>
LTE UL	<i>LTE uplink</i>
MCL	<i>Minimum Coupling Loss</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OOB	<i>Out-of-Band</i>
PMSE	<i>Programme Making and Special Events</i>
PR	<i>Protection Ratio</i>
QEF	<i>Quasi-Error Free</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RF	Radiofrequência
RRC	<i>Root-Raised Cosine</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
SAE	<i>Service Architecture Evolution</i>
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SEAMCAT	<i>Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool</i>
SEM	<i>Spectrum Emission Mask</i>
SET	Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SLP	Serviço Limitado Privado
SRD	<i>Short Range Distance</i>

TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TOV	<i>Threshold of Visibility</i>
TVD	Televisão Digital
TVWS	<i>TV White Space</i>
U.E.	<i>User Equipment</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UNESCAP	<i>United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WS	<i>White Space</i>

1

Introdução

O Brasil, assim como outros países do mundo, está migrando o sistema terrestre de televisão analógica para tecnologia digital, movimento denominado “apagão analógico”. Com esta mudança, partes de espectro ocupado por canais de televisão ficarão disponíveis para os sistemas de comunicação sem fio banda larga [1].

Os sistemas de comunicação sem fio possuem grande potencial para ocuparem estas faixas de espectro, que oferecem características importantes, como, menor perda por reflexão e difração, maior penetração em ambientes fechados, maior área de cobertura e significativa redução nos custos de construção das redes. Assim, a faixa de frequências de 700 MHz foi adotada no padrão mais recente de tecnologia móvel LTE (*Long Term Evolution*, projeto do 3GPP), popularmente conhecido como 4G, e também pelo padrão WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), além de sistemas de microfones sem fio e enlaces de vídeo [1].

Estes serviços poderão, ainda, utilizar os chamados *White Spaces* (WS's), faixas de frequência alocadas para TV, mas que não estão sendo ocupadas em determinadas regiões geográficas. Neste caso, terão que operar em caráter secundário, ou seja, podem sofrer interferências pelos usuários primários autorizados (canais de TV), mas não poderão interromper os serviços de radiodifusão e sua interferência deve ser controlada [2]. De acordo com [2], os TVWS's (*TV White Spaces*) não são considerados, diretamente, como resultado da transição da TV analógica para digital, pois já existem dentro do espectro usado pelos serviços de radiodifusão analógica, ou seja, não podem ser considerados como parte do dividendo digital.

O dividendo digital é definido como o excedente do espectro de frequências após a digitalização da TV. Com a migração do sistema analógico para tecnologia digital, parte da porção superior da banda UHF, faixa que se estende de 698 MHz a 806 MHz, será liberada para os serviços de banda larga móvel.

Com a tecnologia digital, entretanto, os TVWS's serão ampliados, já que constituem uma reserva do espectro que pode ser alocada e, portanto, merece consideração quando as decisões sobre o dividendo são discutidas.

O LTE apresenta requisitos como vazão elevada, baixa latência, operação em FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Frequency Division Duplex*) na mesma plataforma e uma arquitetura simples, baseada na rede IP, que usa um número pequeno de nós, estações-base (BS – *Base Station*) e *gateways*, resultando em baixo custo [1]. Além disso, utiliza o espectro de forma eficiente e fornece taxas de dados elevadas, devido às características de sua arquitetura de rede (SAE – *Service Architecture Evolution*).

A arquitetura SAE opera no domínio da comutação de pacotes usando interface IP em que as estações rádio-base se conectam diretamente ao núcleo da rede móvel, denominado EPC (*Evolved Packet Core*). O EPC oferece a oportunidade de gerar novas arquiteturas de núcleo de rede que podem ser adaptadas para atender às necessidades e topologias das operadoras de telefonia móvel. Ambos LTE e SAE envolvem o sistema EPS (*Evolved Packet System*), que permite a conectividade mais veloz entre o usuário móvel e a Internet. A arquitetura SAE foi desenvolvida para atender os requisitos do LTE, proporcionando níveis mais altos de desempenho da sua rede. As funções, anteriormente tratadas pelo núcleo da rede, foram transferidas para a sua borda, reduzindo o número de nós envolvidos nas conexões, resultando em baixo custo [1]. Assim, os tempos de latência podem ser reduzidos e os dados podem ser transportados de forma mais direta ao seu destino [1]. O LTE adota o esquema de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), técnica que utiliza multiportadoras, que permite utilizar larguras de banda ainda maiores, de modo a transmitir os dados eficientemente e oferecer imunidade ao sinal quanto às interferências e reflexões [1].

Já a TV Digital é uma tecnologia que transmite áudio e vídeo por sinais digitais e apresenta vantagens sobre a TV analógica, como a necessidade de menor banda, permite fornecer serviços de alta definição (HDTV - *High Definition Television*), multimídia e interatividade [1]. O padrão adotado de TV Digital no Brasil é o ISDB-T_B, conhecido como SBTVD. O SBTVD, segundo definição da ANATEL [3], é um conjunto de padrões tecnológicos adotados para transmissão e recepção de sinais digitais terrestres de radiodifusão de sons e

imagens. O SBTVD é responsabilidade de um grupo de pesquisa liderado pela ANATEL, coordenado pelo Ministério das Comunicações, com apoio técnico do CPqD e composto por outros membros, como instituições de ensino e pesquisa, radiodifusores e fabricantes de produtos eletroeletrônicos. O SBTVD se baseia no padrão japonês ISDB-T, usando o mesmo tipo de modulação e todos os parâmetros relacionados à radiofrequência. A principal diferença entre os padrões é a compressão de vídeo e o *middleware*, já que o ISDB-T_B utiliza MPEG4 e GINGA [4].

A necessidade de alocação do dividendo digital para os sistemas móveis de banda larga (IMT - *International Mobile Telecommunications*) tem motivado estudos de mitigação de possíveis interferências entre estes sistemas com a TV Digital, já que os dois sistemas utilizarão bandas adjacentes.

A interferência mútua provoca a degradação do desempenho de cada sistema. A interferência do sistema LTE no receptor de TV Digital leva à deterioração da sensibilidade de recepção, provocando interrupções e, eventualmente, reduzindo a cobertura do sistema de TV Digital. No caso da interferência da TV Digital sobre o sistema LTE, a relação sinal interferência mais ruído (SINR - *Signal to Interference plus Noise Ratio*) pode diminuir, causando a deterioração da QoS (*Quality of Service*) dos usuários LTE próximos ao transmissor de TV Digital [5]. A SINR, dada em dB, é uma medida da qualidade do sinal que afeta a vazão do sistema (*throughput*). Esse parâmetro é utilizado pelas operadoras de telefonia móvel e pela indústria de LTE, em geral, no planejamento das redes e especificações de equipamentos. A razão SINR é medida internamente pela maioria dos U.E.'s (*User Equipments*) e registrada por ferramentas de teste (*drive test*). Quando o nível de sinal SINR da célula LTE está abaixo do nível necessário para manter o desempenho desejado do sistema, a QoS e a vazão são reduzidas, principalmente, na borda da célula [6].

Assim, é essencial realizar estudos que contribuam para definir requisitos para proteger cada sistema de interferências mútuas, permitindo o planejamento do uso do dividendo digital de forma que os sistemas possam coexistir harmoniosamente em bandas adjacentes.

Após o levantamento bibliográfico dos principais trabalhos nacionais de interferência entre os sistemas LTE e TV Digital, observou-se que importantes instituições realizaram testes de laboratório e de campo.

Em laboratório, a ANATEL avaliou dois cenários básicos: (1) interferência dos transmissores do *eNodeB* (*enhanced NodeB*) LTE nos receptores de TV Digital fixos e móveis e (2) interferência dos terminais LTE nos receptores de TV Digital fixos e móveis [7]. Eles avaliaram a relação de proteção, saturação e técnicas de mitigação em cinco receptores. Também testaram um filtro-protótipo na recepção do sinal de TV Digital. A SET (Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão), em conjunto com a Universidade Mackenzie, realizou um estudo para determinar os efeitos das interferências que os transmissores das BS's e dos U.E.'s podem causar nos receptores de TV Digital. Eles realizaram testes de caracterização de seis receptores comerciais de TV. Os testes também avaliaram a relação de proteção, o limiar de bloqueio dos receptores comerciais de TV Digital, em relação aos transmissores LTE [8]. Além disso, apresentaram os cenários padrões de interferência, baseados no relatório ITU-R BT. 2247-2 (parte B), mas com parâmetros especificados na Resolução no 625/2013 da ANATEL.

Em campo, a ANATEL realizou testes na cidade de Pirenópolis (GO) [9]: (1) interferência do sistema LTE na TV Digital: (a) testes de *downlink* e (b) *uplink*, e (2) interferência da TV Digital na (a) recepção do *eNodeB* LTE e (b) na recepção dos terminais CPE (*Customer Premises Equipment*) e móvel do sistema LTE. Eles avaliaram os seguintes parâmetros: relação de proteção de canal adjacente 51 e canal imagem 48, relação de proteção co-canal e ACLR do sistema de transmissão LTE (U.E. e *eNodeB*), com o objetivo de determinar a convivência mútua entre os sistemas LTE e TV Digital e as técnicas de mitigação.

A UFPA analisou, por meio de simulações de Monte Carlo, a interferência mútua entre os sistemas de TV Digital e LTE em canal adjacente na faixa de 700 MHz, na região geográfica de 1000 km². Através do simulador SEAMCAT (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*), as distâncias mínimas de separação, bandas de guarda adequadas, a probabilidade de interferência do LTE na TV Digital, a relação SINR no LTE U.E. e a capacidade do canal LTE foram determinadas [10].

Para dar continuidade a estes estudos, foi realizada uma campanha de medições em um ambiente controlado no INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), que avaliou a interferência e a convivência entre o SBTVD e o LTE na faixa de 700 MHz, operando em bandas adjacentes. Nos testes de campo foi avaliada a interferência produzida pelos

equipamentos do sistema LTE em receptores de TV Digital através da análise subjetiva da imagem e da ocorrência de artefatos (pixelização ou congelamento) conforme critérios estabelecidos na Rec. ITU-R 2035 [11]. Por outro lado, a interferência do sistema de TV Digital, no sistema LTE, foi avaliada através da verificação de parâmetros fornecidos por um gerador de tráfego de dados, como vazão (Mbps), *jitter* (ms) e perda de pacotes (%) [12].

Na etapa seguinte do trabalho, a interferência entre o sistema de comunicação banda larga no padrão LTE e o SBTVD, operando na faixa de frequências de 700 MHz, foi avaliada por um simulador baseado no método de Monte Carlo, denominado SEAMCAT [13]. A validade do uso do simulador foi estabelecida por comparação com os resultados experimentais em ambiente controlado. Verificou-se que o simulador alcança os objetivos deste tipo de análise, permitindo estender os resultados do experimento controlado para situações reais, com grande número de usuários com distribuição espacial aleatório, o que seria dispendioso de caracterizar experimentalmente. O *software* SEAMCAT [13] produz distribuições espaciais e temporais aleatórias dos sinais recebidos e permite calcular a probabilidade estatística resultante de interferência. Assim, cenários de interferência mais complexos, que ocorrem em situações reais, foram analisados para avaliar os efeitos das variações das distâncias entre os sistemas, das potências de transmissão e das direções dos enlaces dos sistemas vítima e interferente.

A validação do simulador SEAMCAT, através dos resultados obtidos em campo, representa uma importante contribuição científica deste trabalho, permitindo identificar as condições para a convivência entre ambos os sistemas.

Na avaliação de interferência do LTE na TV Digital em cenários mais complexos, com múltiplos sinais interferentes e múltiplos receptores de TV, foram calculadas a probabilidade de interferência, a relação C/I média e a percentagem de usuários de TV ativos (com sinal recebido acima do limiar na ausência de interferência), obtidas em diferentes simulações, variando-se a EIRP (*Effective Isotropically Radiated Power*) da TV e a área de cobertura da TV. Já na avaliação de interferência da TV Digital no LTE, o efeito desta interferência foi mensurado pela perda de capacidade (taxa de bits/usuário) do sistema LTE.

Outra contribuição importante do trabalho foi realizar um estudo de caso, considerando um sistema celular e um sistema de TV operando atualmente no Rio

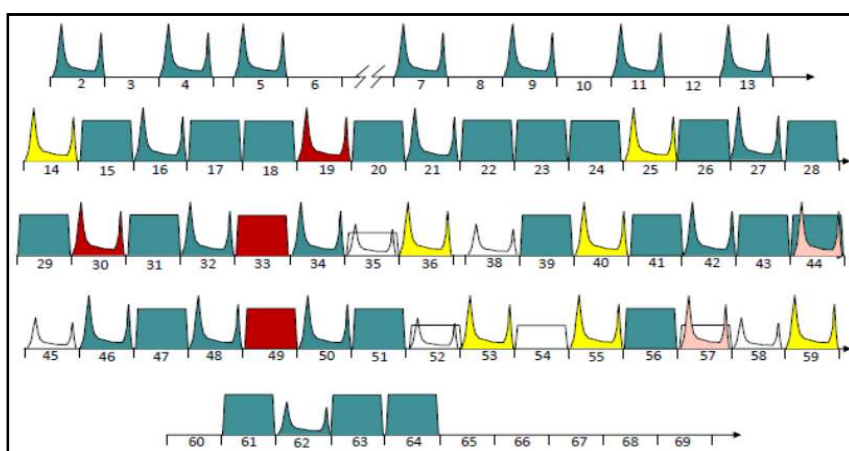
de Janeiro, apenas adaptando as frequências de operação para criar a situação de interferência que poderá ocorrer no futuro, quando o sistema celular efetivamente ocupar a faixa de 700 MHz. Quatro cenários foram avaliados no SEAMCAT e para cada um deles foram obtidos parâmetros, como, a probabilidade de interferência, a razão C/I média e a percentagem de usuários de TV ativos, variando-se a EIRP da TV e o número de usuários ativos por célula LTE. Ao final do estudo, foram propostas técnicas de mitigação para minimizar os efeitos de interferência sobre o sistema vítima.

1.1. Contexto

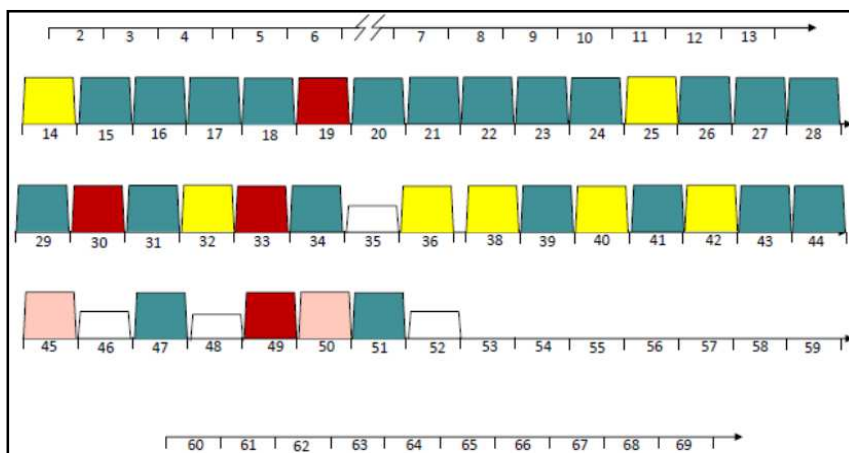
O serviço de radiodifusão terrestre utiliza significativa parte do espectro de frequências. No Brasil, o serviço ocupa a banda VHF, canais 2 (54 MHz) a 13 (216 MHz), e, principalmente, a banda UHF nos canais 14 (470 MHz) a 69 (806 MHz). Por muitas décadas, as bandas VHF e UHF têm sido utilizadas em todo o mundo para fornecer sinais de TV analógica. O seu desligamento no Brasil teve início em Fevereiro de 2016, no município de Rio Verde (GO), com encerramento previsto até 31 de dezembro de 2023 [14], inicialmente nos grandes centros urbanos e depois, gradativamente, nas outras cidades. Dos 5.000 municípios no Brasil, 473 (concentrados nos estados das regiões Sul e Sudeste, além de Pernambuco, Rondônia e Goiás) precisarão realocar os canais de TV, sendo que 377 destes municípios possuirão intervalos ociosos no espectro entre os canais 14 e 51, que podem receber os canais remanejados [15].

O espectro de frequências é um recurso finito e já está alocado, em sua totalidade, a um grande número de serviços em cada país, de acordo com [16]. No Brasil, o espectro de frequências, que é atualmente ocupado pelo sinal de TV analógica na faixa de 698 MHz a 806 MHz, correspondente aos canais 52 a 69, dará lugar à tecnologia 4G [3], permitindo maior compactação na faixa que corresponde aos canais 14 a 51 [17]. Existem 12 canais na banda VHF e 56 canais na banda UHF, no Brasil. Cada canal ocupa 5,7 MHz do espectro, e com a realocação dos canais será liberado um intervalo de mais de 160 MHz do espectro de radiofrequências.

Os sistemas de TV Digital permitem maior economia do espectro do que a TV analógica, com eficiência até seis vezes maior, dependendo das técnicas de modulação e codificação [18]. A Figura 1.1 (a) representa a ocupação espectral na região de São Paulo na fase de transição, em que ocorre a transmissão simultânea analógica/digital (*simulcasting*). Os canais analógicos são indicados por formatos que representam as portadoras de áudio e vídeo de um sinal padrão, e os canais digitais são indicados por quadriláteros coloridos. Após o desligamento do sinal analógico, a distribuição do espectro passa a ter a configuração representada na Figura 1.1 (b) [19].



(a)



(b)

Cores: verde – canais pareados, amarelo – canais não pareados, vermelho – canais de TV por assinatura, rosa – canais secundários e sem cor – canais de outras localidades que influenciam tecnicamente a região em estudo.

Figura 1.1: Representação da ocupação espectral na região de São Paulo: (a) sinais analógicos e digitais, (b) apenas sinais digitais [17] [19]

Segundo a ANATEL [20], os Serviços de Radiodifusão de Sons e Imagens e de Retransmissão de Televisão com tecnologia digital dispõem dos canais, com largura de faixa de 6 MHz, relacionados nas Tabelas 1.1 e 1.2. A faixa de VHF baixo (canais 2 ao 6) não foi considerada para a utilização na transmissão digital de sinais de televisão, devido à sua ineficiência técnica. A faixa de 608 a 614 MHz (canal 37) é atribuída ao serviço de radioastronomia [21].

Tabela 1.1: Canalização para TV Digital na faixa de VHF [20]

Canal	Faixa de frequências (MHz)	Canal	Faixa de frequências (MHz)
2	54 – 60	8	180 – 186
3	60 – 66	9	186 – 192
4	66 – 72	10	192 – 198
5	76 – 82	11	198 – 204
6	82 – 88	12	204 – 210
7	174 – 180	13	210 – 216

Tabela 1.2: Canalização para TV Digital na faixa de UHF [20]

Canal	Faixa de frequências (MHz)	Canal	Faixa de frequências (MHz)
14	470 – 476	38	614 – 620
15	476 – 482	39	620 – 626
16	482 – 488	40	626 – 632
17	488 – 494	41	632 – 638
18	494 – 500	42	638 – 644
19	500 – 506	43	644 – 650
20	506 – 512	44	650 – 656
21	512 – 518	45	656 – 662
22	518 – 524	46	662 – 668
23	524 – 530	47	668 – 674
24	530 – 536	48	674 – 680
25	536 – 542	49	680 – 686
26	542 – 548	50	686 – 692
27	548 – 554	51	692 – 698
28	554 – 560	52	698 – 704
29	560 – 566	53	704 – 710
30	566 – 572	54	710 – 716
31	572 – 578	55	716 – 722
32	578 – 584	56	722 – 728
33	584 – 590	57	728 – 734
34	590 – 596	58	734 – 740
35	596 – 602	59	740 – 746
36	602 – 608		

A faixa liberada, denominada de faixa de 700 MHz, oferece excelentes características de propagação para a comunicação móvel, uma vez que suportam a implementação de soluções adequadas à realidade brasileira, considerando a dimensão geográfica do país. Também, é ideal para vastas regiões com baixa

densidade populacional, particularmente nas áreas rurais [22], pois oferece um alcance maior, além de melhorar a recepção do sinal em ambientes *indoor*.

A transição permitirá o aumento da capacidade dos serviços móveis de forma a atender ao crescimento exponencial do tráfego de dados, a expansão da cobertura da banda larga móvel e o aumento da eficiência espectral, por meio de uma infraestrutura reduzida, que pode oferecer a mesma cobertura móvel comparada com o espectro de 2,5 GHz, faixa leiloadada pelo governo brasileiro para 4G em junho de 2012. Por estas razões, América, Europa e Japão já alocaram este intervalo do espectro para as operadoras móveis [23], a fim de maximizar a eficiência e os recursos do espectro.

A ocupação da faixa de 700 MHz no Brasil é organizada pelo grupo sem-fio APT (*Asia-Pacific Telecommunity*) [24]. A APT foi fundada em conjunto com a UNESCAP (*United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific*) e ITU (*International Telecommunication Union*). É uma organização intergovernamental que opera, juntamente, com as prestadoras de serviços de telecomunicações, fabricantes de equipamentos de comunicação e organizações de pesquisa e desenvolvimento no campo de tecnologias de comunicação, informação e inovação. Ela abrange 38 países membros, com 4 membros associados e 131 afiliados [25].

As especificações atuais desenvolvidas pelo 3GPP foram concluídas em junho de 2012, e podem ser encontradas em [26] para o U.E. e [27] para a BS. Os dois planos atualmente adotados pelo Japão são: modo FDD que oferece 45 MHz (*uplink*) + 45 MHz (*downlink*) de espectro e outro para TDD. Ambos os modos envolvem a faixa de frequência de 698 a 806 MHz, como o plano americano de 700 MHz. O plano de espectro da APT oferece uma solução alternativa para a América Latina, com economias de escala [24].

1.2. Relevância

O conceito do dividendo digital é amplo e complexo. Indústrias, governos, universidades, consultores do Brasil e do mundo têm realizado pesquisas a fim de organizar seus diversos aspectos e impactos e, assim, recomendar ações para reduzi-los tanto quanto possível. Os governos, operadoras, fornecedores de

equipamentos e indústrias de telecomunicações, em geral, já estão trabalhando neste processo [28]. Depois de concluir a realocação espectral, o *gap* do dividendo digital pode ser ocupado por outros serviços, como TV móvel, PMSE (*Programme Making and Special Events*), acesso BWA (*Broadband Wireless Access*), sistemas privados de rádio móvel, entre outros. A questão mais importante é como planejar a migração da TV analógica para digital, de modo a proporcionar benefícios ao governo e à população do Brasil [29].

O planejamento do espectro é importante para que o SBTVD e outros serviços, que operarem em canais adjacentes no *gap* do dividendo digital, possam coexistir harmoniosamente. De acordo com a série “Observatório Móvel” da GSMA (*Groupe Speciale Mobile Association*), publicada em 2012 [30] e dedicada ao Brasil, a tendência de crescimento da indústria de comunicações móveis deve continuar exponencialmente, como consequência do crescente sucesso dos *smartphones* e *tablets*. Esta evolução exige rápidas e novas alocações do espectro ao serviço de banda larga móvel, o que torna este serviço um forte candidato para alocar os *gaps* do dividendo digital. O crescimento do tráfego de dados nestas redes, em média, deverá ser de 83% ao ano entre 2008 e 2020, com mais de 75 milhões de *smartphones* previstos no país em 2016 [30]. A demanda pela banda larga móvel deverá crescer 20 vezes entre 2015 e 2020 [30], por isso, muito se fala da importância do dividendo digital para os serviços de banda larga móvel.

O mercado de telefonia móvel na América Latina é, atualmente, o quarto maior do mundo com 326 milhões de assinantes e, no final de setembro de 2014, havia 718 milhões de conexões, de acordo com um estudo recente da GSMA divulgado na Reunião Plenária nº. 42 da GSMA América Latina [31]. As quatro principais megacidades com mais de 10 milhões de pessoas da América Latina estão entre as 15 maiores aglomerações urbanas do mundo: México (3°), São Paulo (6°), Buenos Aires (12°) e Rio de Janeiro (14°) [31]. Conhecendo esta dimensão urbana, um pouco mais da metade da população da América Latina já é assinante de um serviço móvel e este número deve chegar a 60% em 2020 [31].

Outro fator que favorece o setor móvel é que a capacidade da estação rádio-base (ERB) de fornecer serviços em uma área maior é proporcional à faixa de frequências em que atua. Assim, a área de serviço aumenta com o quadrado da banda. O número de ERB's necessárias para cobrir uma determinada área em 2600 MHz é dez vezes maior do que em 800 MHz, portanto, maior será o custo

total da rede de infraestrutura (RF). Além disso, as frequências UHF têm maior facilidade de penetrarem prédios e são ideais para regiões rurais [2].

O grupo GSMA espera que a tecnologia 4G, no Brasil, siga uma trajetória similar às redes anteriores, porém de forma mais acelerada. Após o leilão dos lotes da telefonia celular 4G no país, em junho de 2012, os serviços 4G foram lançados comercialmente em 2013, na faixa de 2500 MHz [30]. Em setembro de 2014, o Brasil apresentou 4,6 milhões de conexões 4G. As operadoras estão investindo cada vez mais nas redes 4G, para atender à crescente demanda por serviços de banda larga móvel [31].

Em setembro de 2014, o Brasil concluiu o leilão de 700 MHz, oferecendo seis lotes de 10 MHz + 10 MHz cada um em caráter primário, sendo três com abrangência regional e outros três nacionais. Foi atribuída uma faixa de 60 MHz a três concessionárias de telefonia com cobertura nacional e dois lotes regionais ficaram sem propostas. O total de lances para o leilão de 700 MHz no Brasil foi de R\$5,8 bilhões, excluindo um custo adicional de R\$3,6 bilhões a ser pago aos radiodifusores para a limpeza do espectro, compra e instalação de equipamentos. O valor total arrecadado pelo governo foi 29% menor do que foi previsto pelo Ministério da Fazenda, que esperava, no mínimo, R\$8,2 bilhões [31].

De acordo com [31], esta tendência indica que a banda de 700 MHz será licenciada no restante da América Latina entre 2015 e 2016, consolidando o seu papel como banda estratégica para universalizar os serviços de banda larga móvel na região. Na maioria dos países, não será necessário esperar pelo desligamento da TV analógica para a atribuição do dividendo digital, o que deve acontecer somente depois de 2018 [31].

A ANATEL criou em agosto de 2012 um grupo de trabalho (GT 700 MHz) para estudar as condições de uso do espectro na faixa de 700 MHz. Após diversas atividades, estudos e campanhas de medição, o grupo revelou que é possível a realocação da faixa de 700 MHz para a implementação de sistemas IMT [22]. Como o Brasil é um país de dimensões continentais, a subfaixa de 700 MHz possui características de propagação adequadas para cobertura dos serviços móveis, desde que haja convivência mútua entre os sistemas IMT e TV Digital [22]. É importante ressaltar o Art. 10 § 1º do Regulamento 625 [32] que “a interessada no uso das subfaixas deverá prover todos os meios necessários para assegurar a proteção contra sinais interferentes nos sistemas existentes operando

em caráter primário”, garantindo que os serviços de telecomunicações e de radiodifusão estejam protegidos de eventuais interferências prejudiciais entre si.

O LTE é a evolução da tecnologia 3G especificado no padrão 3GPP. De acordo com [33], as redes LTE se destinam a preencher a lacuna da transferência operacional de dados entre LAN's (*Local Area Network*) fixas sem fio e as redes celulares, para serviços de grande mobilidade e com elevadas taxas de dados. Em vários países da América Latina, o dividendo digital já foi atribuído aos serviços de telefonia móvel e de TV Digital, indicando a possibilidade de ambos os serviços conviverem harmoniosamente na faixa de 700 MHz [31].

No Brasil, a faixa de UHF baixo (470 a 698 MHz) está alocada apenas aos serviços de radiodifusão em caráter primário, exceto o canal 37 (608 a 614 MHz) que é reservado aos serviços de radioastronomia. Em 2013, a ANATEL relatou a existência de 10.849 licenças de TV analógica na faixa UHF baixo e que todos os municípios estavam cobertos, atendendo mais de 95% da população. Na mesma época, a agência também concedeu 2.921 licenças de transmissão de TV Digital, cobrindo 11% dos municípios e atendendo 50% da população. Depois que ocorrer o desligamento do sinal analógico, todas as licenças serão utilizadas para a radiodifusão digital. Já a cobertura da banda larga móvel, na faixa UHF baixo, abrangeria um total estimado de 98,05% da população da América Latina. Esta cobertura de banda larga móvel adicional resultaria no aumento significativo da banda larga, que é um objetivo de política pública da maioria dos governos desta região [34].

1.3.

Organização do texto

Na sequência deste capítulo introdutório, o capítulo 2 apresenta um resumo de trabalhos anteriores sobre o tema, realizados pela ANATEL, pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, pela Universidade Federal do Pará e pelo grupo GSMA no Brasil.

No capítulo 3, é descrita a campanha de medições, realizadas em ambiente controlado no campus laboratorial do INMETRO, para avaliar a interferência produzida entre os sistemas LTE e TV Digital.

No capítulo 4, são apresentados: o simulador SEAMCAT baseado no método de Monte Carlo, sua configuração para avaliação da interferência entre sistemas de TV Digital ISDB-T_B e sistemas LTE, a validação do uso do simulador estabelecida por comparação com os resultados experimentais em ambiente controlado e os resultados de simulação.

No capítulo 5, são apresentados os resultados da simulação de interferência agregada em cenários com múltiplos receptores de TV Digital e múltiplas estações rádio-base e usuários móveis LTE. Tanto a interferência do sistema LTE na TV Digital, como a interferência da TV Digital nos usuários LTE, são consideradas. A partir destes resultados é possível estabelecer os requisitos e limites para a convivência entre os sistemas, bem como medidas de mitigação de interferências necessárias.

No capítulo 6, são apresentados os resultados do estudo de interferência do sistema LTE nos receptores de TV Digital no município do Rio de Janeiro. Para considerar uma análise real, foram levantadas as posições dos transmissores de uma radiodifusora de TV Digital e de uma operadora de telefonia móvel 4G. Após este levantamento, o cenário de interferência foi criado no SEAMCAT e os pares de receptores-vítima e interferentes foram distribuídos aleatoriamente na área de cobertura da televisão. Como forma de mitigar a interferência no sistema vítima, foram usadas duas curvas de atenuação do filtro de recepção da TV, uma curva que representa um filtro ideal e outra um protótipo comercial.

O capítulo 7 apresenta um resumo das conclusões do trabalho e sugestões para a sua continuidade.

2

Trabalhos anteriores

Para o levantamento do estado da arte no assunto em estudo, foram pesquisadas avaliações de coexistência entre sistemas de TV Digital e sistemas IMT. São descritos, no presente capítulo, resultados de trabalhos realizados no Brasil, envolvendo diversos aspectos e abordagens. São apresentados resultados de testes realizados pela ANATEL em laboratório [7] e em campo [9], testes com receptores de TV Digital da SET com a Universidade Presbiteriana Mackenzie [8], testes da Universidade Federal do Pará para análise de interferência entre os sistemas de TV Digital e LTE em canal adjacente na faixa de 700 MHz [10] e testes do grupo GSMA para avaliar a coexistência dos sistemas de TV (analógica e digital) e LTE [35].

2.1.

Trabalhos da ANATEL

A ANATEL pretende elaborar um regulamento contra interferências prejudiciais, com o objetivo de garantir a convivência entre os sistemas IMT (tecnologia LTE) e TV Digital (padrão ISDB-T_B) na faixa de 700 MHz. Assim, realizou testes laboratoriais, em Abril de 2014, para identificar e avaliar as possíveis interferências mútuas entre estes sistemas. O estudo avaliou dois cenários básicos: (1) interferência do *eNodeB* nos receptores de TV Digital fixos e móveis (sentido de *downlink*) e (2) interferência dos terminais LTE (U.E.) nos receptores de TV Digital fixos e móveis (sentido de *uplink*) [7].

Esses testes de bancada foram realizados no laboratório do INATEL, em ambiente controlado na cidade de Santa Rita do Sapucaí, de modo a desconsiderar o desvanecimento de multipercurso. O método utilizado foi QEF (*Quasi-Error Free*), variando o nível do sinal interferente e observando a qualidade da imagem, através dos receptores de TV em teste, num intervalo de 60 segundos. Desta forma, foi possível avaliar a razão de proteção de canal adjacente de forma subjetiva [7].

Os resultados apresentados no relatório [7] foram obtidos considerando as variáveis relevantes dos testes, como interferência de *downlink* e de *uplink*, carregamento do sinal LTE, largura do sinal LTE, modulação do sinal de TV e receptor de TV.

O documento [7] apresentou as seguintes conclusões:

(1) O teste em laboratório avaliou a relação de proteção, saturação e técnicas de mitigação em 5 tipos de receptores, que são 3 *sillicon tuners*, 1 *can tuner* e 1 *one-seg*.

(2) Os resultados indicaram que a convivência é possível, mas que, eventualmente, podem ocorrer casos de interferência que deverão ser tratados com técnicas de mitigação. A técnica avaliada nos testes em laboratório foi a utilização de filtro passa-baixa na entrada do receptor de TV.

(3) Os resultados mostraram, ainda, que o filtro testado resolveu os problemas de interferência nas condições testadas para o *downlink*, porém, não foi suficiente para proteger o *uplink* em condições específicas, devido à diferença de afastamento espectral. Os receptores também apresentaram maior imunidade na faixa dos sinais de *downlink* pelo mesmo motivo, exceto na situação de frequência imagem, em que a seletividade do receptor é menor, neste caso seria necessário o uso de dois filtros em cascata.

(4) Para complementar esses testes laboratoriais e compreender questões não conclusivas, como o convívio entre os sistemas de TV Digital e do LTE *uplink*, foram necessários testes de campo. Em laboratório, o ambiente avaliado não reflete a realidade dos testes em campo que utilizam equipamentos reais.

Na segunda etapa do estudo, a ANATEL realizou testes de campo, em ambiente real em área aberta, na cidade de Pirenópolis (GO), onde a unidade móvel de medição era posicionada em três locais diferentes e o quarto local era o ponto fixo de medição. Quatro cenários básicos foram avaliados nos testes [9]:

- Interferência do sistema LTE na TV Digital: testes de (a) *downlink* e (b) *uplink*,
- Interferência da TV Digital na (a) recepção do *eNodeB* LTE e (b) na recepção dos terminais CPE e móvel do sistema LTE.

Os parâmetros avaliados neste trabalho foram: relação de proteção de canal adjacente 51 e canal imagem 48, relação de proteção co-canal e ACLR do sistema de transmissão LTE (U.E. e *eNodeB*), com o objetivo de determinar a convivência

mútua entre os sistemas LTE e TV Digital e as técnicas de mitigação [9]. As técnicas avaliadas nos testes de campo foram: uso do filtro passa-baixa nos receptores de TV Digital, ajustes no posicionamento das antenas receptoras de TV Digital e uso de filtro passa-faixa no *eNodeB*. O documento [9] apresentou as seguintes conclusões:

(1) O uso de filtro passa-baixa na entrada RF da TV ou logo após a antena foi a solução mais recomendada para a situação de interferência do LTE *downlink* no receptor de TV com antena interna ou externa, sem a presença de amplificador integrado. Ainda assim, o uso de filtros em cascata pode ser necessário, principalmente, nos casos de antena externa conectada a um amplificador.

(2) A interferência cessou no teste de interferência do LTE *downlink* no receptor de TV, em que dois filtros em cascata foram usados, assim não houve a necessidade do aumento da potência de transmissão de TV. A mitigação por filtro não foi suficiente para cessar a interferência na situação com amplificadores integrados à antena interna de TV.

(3) O uso de filtro passa-baixa foi suficiente para resolver os problemas de interferência do *uplink* na recepção de TVD com antena interna passiva.

(4) O uso de filtro passa-baixa pode não ser eficaz para situações com terminal, cujo, valor ACLR seja próximo ao limite normativo. O ACLR é um parâmetro que quantifica as emissões indesejáveis e representa um fator determinante na razão de proteção. Ressalta-se que quanto maior for o valor de ACLR, melhor a convivência entre os sistemas, diminuindo a possibilidade de interferências.

(5) O uso de filtros na recepção do *eNodeB* pode ser necessário para o caso de interferência a partir do transmissor de TV, em situações nas quais o *eNodeB* esteja próximo da estação radiodifusora, operando no canal 51. Outra técnica de mitigação avaliada foi a variação da potência do transmissor de TV Digital com diferentes distâncias entre os transmissores de TV e o *eNodeB*. Segundo [9], a adoção do planejamento adequado do apontamento das antenas é outro fator importante para a mitigação.

(6) Na situação de interferência da TVD na recepção do U.E., os testes indicaram alta degradação na qualidade do sistema LTE que não é frequentemente identificada em ambientes reais.

(7) Na situação de interferência do sistema LTE *uplink* no receptor de TV Digital, os testes indicaram que o uso de antena externa, aumenta o nível do sinal recebido no receptor de TV, ou seja, diminui o potencial de interferência do sinal interferente.

(8) Os testes indicaram que os receptores de TV Digital apresentaram sensibilidade à interferência em diferentes situações de convivência, assim, recomendou-se a construção de receptores, amplificadores e antenas de TVD que se ajustem às condições de convivência entre os sistemas avaliados.

(9) Para resolver os problemas de interferência do sistema LTE na TV Digital considerou-se a necessidade de terminais móveis com melhor desempenho, frente à máscara de emissão de espúrios dos *eNodeB's* e dos terminais móveis.

2.2. Trabalhos da Universidade Mackenzie

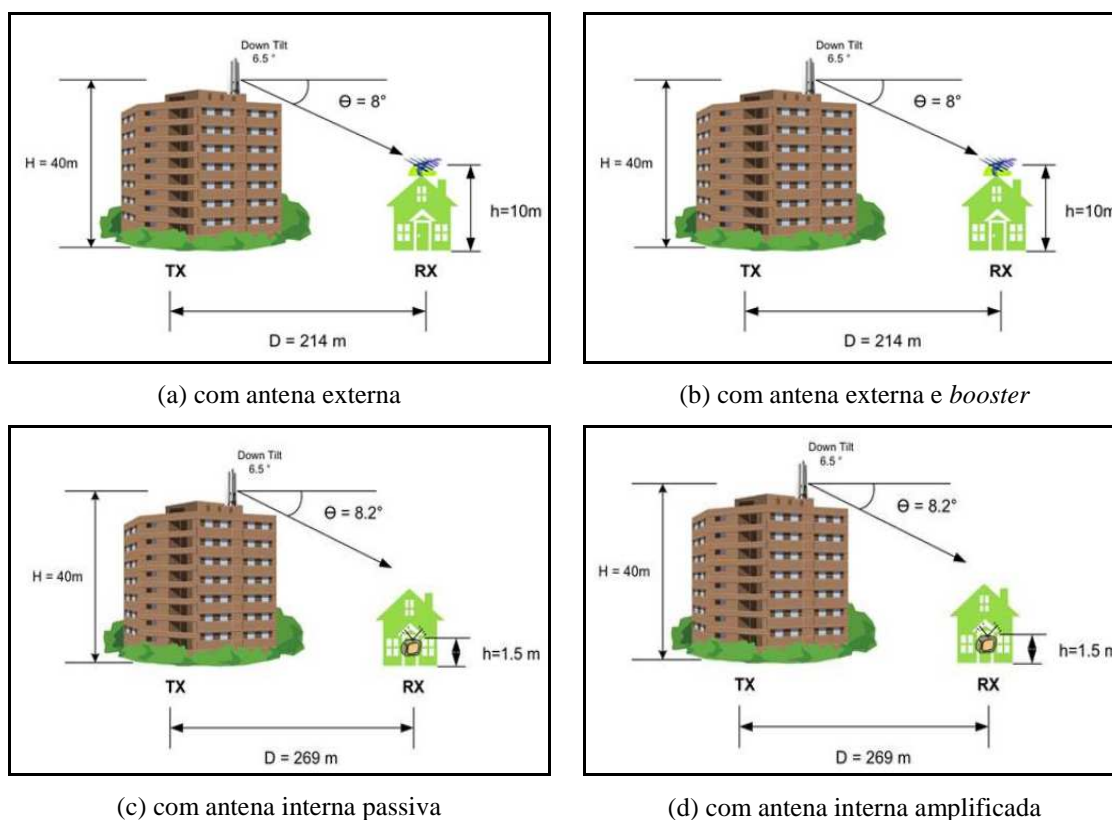
A SET também vem acompanhando os trabalhos em outros países e na ITU. O grupo realizou um estudo para determinar os efeitos das interferências que os transmissores de sinal LTE e os U.E.'s podem causar nos receptores de TV Digital. Os testes também avaliaram a relação de proteção e o limiar de bloqueio dos receptores comerciais de TV Digital, em relação aos transmissores LTE operando na faixa UHF alto (698 – 806 MHz). Estes testes foram realizados em condições controladas e dentro de uma gaiola de Faraday, no laboratório de pesquisas em TV Digital da Universidade Presbiteriana Mackenzie, de forma a evitar quaisquer interferências externas. A avaliação da qualidade de imagem consistiu na observação de artefatos na tela da TV com a inserção controlada de interferência, empregando o método QEF [8].

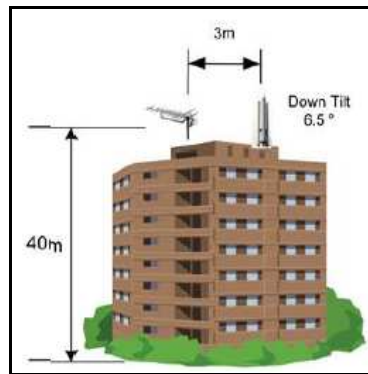
Foram realizados testes de caracterização de seis receptores comerciais de TV Digital: (1) mínimo nível de sinal de entrada no receptor, (2) máximo nível de sinal na entrada do receptor, (3) imunidade à interferência dos canais adjacentes ISDB-T_B e (4) imunidade à interferência co-canal ISDB-T_B. Os resultados mostraram que os receptores testados estão em conformidade com a norma ABNT NBR 15604 contra interferência dos sinais LTE [8].

De acordo com relatórios provenientes do exterior e testes realizados pela Universidade Presbiteriana Mackenzie [8], alguns receptores de TV Digital podem apresentar comportamento “instável” na presença do sinal LTE. Isto pode ser consequência das variações rápidas do sinal LTE, ocasionando degradações de desempenho nos receptores de TV Digital em banda adjacente, devido à forma de funcionamento do circuito de CAG (Controle Automático de Ganho) e dos algoritmos de estimativa do canal.

O parâmetro ACLR também foi medido, pois é importante para determinar a qualidade do sinal de um transmissor ou de um gerador de sinais LTE de *downlink* (BS) e *uplink* (U.E.), em termos de suas emissões fora da faixa designada. Além disso, foram apresentados os cenários padrões de interferência do sistema LTE nos receptores de TV Digital, baseados no relatório ITU-R BT. 2247-2 (parte B), mas com parâmetros especificados na Resolução nº 625/2013 da ANATEL. Em seguida, o nível do sinal LTE na entrada da antena de TV Digital foi calculado [8] [36].

A Figura 2.1 apresenta os cenários de interferência do sinal LTE nos sistemas de recepção da TV [8].

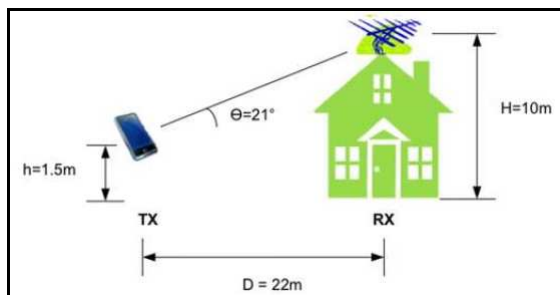




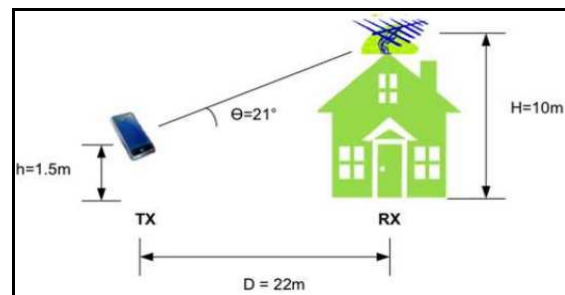
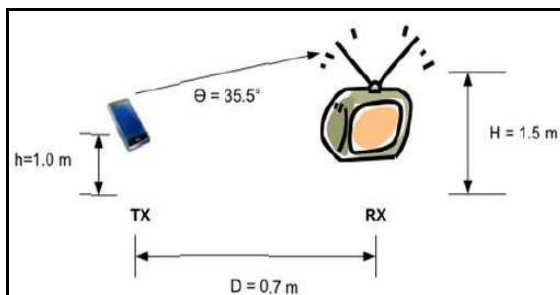
(e) com antena coletiva colocalizada

Figura 2.1: Cenários de interferência da BS no receptor de TV Digital [8]

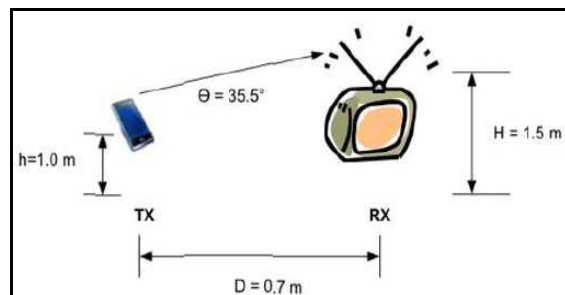
A Figura 2.2 apresenta os modelos de interferência do terminal móvel de usuário para diferentes configurações de instalações de antenas residenciais [8].



(a) com antena externa

(b) com antena externa e *booster*

(c) com antena interna passiva



(d) com antena interna amplificada

Figura 2.2: Cenários de interferência do U.E. no receptor de TV Digital [8]

O documento [36] apresenta o resumo e análise dos testes laboratoriais encomendados pela SET à Universidade Presbiteriana Mackenzie. De acordo com a SET:

(1) Os resultados obtidos nos testes mostraram que as especificações LTE definidas pela Resolução nº. 625/2013 da ANATEL não garantem a convivência de ambos os sistemas livre de interferência e, assim, mostraram a necessidade de

definir técnicas de mitigação para reduzir ou resolver os problemas de interferência do sistema LTE na TV Digital.

(2) Os testes mostraram a necessidade de medidas de mitigação, como, a instalação de filtros nos transmissores das ERB's LTE para reduzir as emissões interferentes e nos receptores de TV Digital para melhorar a proteção contra as interferências. Esta segunda medida é crítica, pois afeta todo o sistema já instalado, necessitando de mão de obra treinada e habilitada para a troca de eletrônicos e amplificadores, a instalação de filtros, o alinhamento e a troca das antenas de recepção de TV e a substituição de sistemas simples de recepção interna por sistemas complexos com antenas externas ou coletivas.

(3) Em casos críticos, pode haver a necessidade do uso de filtros operando conjuntamente nos receptores de TV e nos transmissores das ERB's, mas não suficiente, exigindo técnicas de mitigação adicionais, como, a redução das potências de transmissão das ERB's, modificações na recepção de TV e o aumento da banda de guarda.

De acordo com os testes apresentados em [8], os casos de interferências mais graves são provenientes da BS no receptor de TV Digital com antena coletiva e com amplificação e do U.E. no receptor de TV Digital com antena interna. [36]

2.3. Trabalhos da UFPA

O trabalho realizado pela Universidade Federal do Pará, em Novembro de 2014 [10] analisou a interferência mútua entre os sistemas de TV Digital e LTE em canal adjacente na faixa de 700 MHz, na mesma região geográfica de 1000 km². As distâncias mínimas de separação e bandas de guarda adequadas para garantir a coexistência entre estes sistemas foram determinadas através de simulações de Monte Carlo [13].

Este estudo [10] concentrou-se no *uplink* do LTE, pois é o sentido que mais sofre interferência, se comparado com o *downlink*, de acordo com as referências citadas pelo autor. No sentido de *uplink*, o esquema de modulação usado é o SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) que é mais simples

do que o OFDMA, pois garante a eficiência de energia no U.E.. O OFDMA é um esquema de modulação mais robusto contra interferências, utilizado no *downlink*.

Além disso, parâmetros como a probabilidade de interferência do LTE na TV Digital, a relação SINR no U.E. LTE e a capacidade do canal LTE foram calculadas para avaliar o desempenho entre estes sistemas na presença de interferência mútua. Estes parâmetros foram calculados pelo programa SEAMCAT [13].

O primeiro cenário [10] avalia a interferência do LTE na TV Digital. O estudo concluiu que a probabilidade de interferência depende, principalmente, da distância de separação entre os sistemas e a banda de guarda. Quanto menor o intervalo de guarda e menor a distância de separação, a probabilidade de interferência é maior, como pode ser observado na Tabela 2.1. A probabilidade de interferência tende a diminuir com o aumento da distância de separação entre os sistemas interferente e vítima. Assim, o sistema LTE irá interferir no sistema de TV Digital quando a probabilidade de interferência estiver acima do limiar definido em [10], caso contrário, a TV Digital poderá operar de forma satisfatória. O estudo também concluiu que a probabilidade de interferência do sistema LTE na TV Digital não depende da largura de banda do sinal interferente LTE, já que a variação desta probabilidade para larguras de banda de 5, 10 e 20 MHz é muito pequena [10].

Tabela 2.1: Resultados da probabilidade de interferência provocada pelo LTE, operando com 20 MHz de largura de banda na TV Digital [10]

Separação mínima entre os sistemas (km)	Banda de guarda (MHz)	Limiar da probabilidade de interferência	Probabilidade de interferência
1	2	5%	70%
10	2	5%	~8%
1	3	5%	35%
4	3	5%	5%
10	3	5%	0%
1	4	5%	6%
2	4	5%	~1,2%
10	4	5%	0%

O segundo cenário de [10] avaliou a interferência que o LTE (canal 52) poderá sofrer pela TV Digital (Classes Especial, A, B e C) operando no canal 51. A Classe Especial é utilizada somente para as estações de Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens (TV), e as Classes A, B e C admitem a função de

Retransmissão de TV (RTV) [10]. Os resultados foram apresentados na forma de perda de capacidade do canal no sentido *uplink* do LTE. Esta perda de capacidade foi determinada pela perda da capacidade do U.E. causada pela interferência da TV Digital. No caso da perda de capacidade abaixo do limiar, definido em [10], o sistema LTE sofre interferência da TV Digital, porém opera com desempenho satisfatório.

Os resultados mostraram que a perda de capacidade provocada pela TV Digital de Classe Especial é sempre maior, independentemente da largura de banda do LTE (5, 10 ou 20 MHz). A Classe Especial opera com potência de transmissão muito alta que varia de 80 a 100 kW. Assim, é necessária uma distância mínima de separação relativamente maior para permitir a coexistência entre os sistemas de TV Digital Classes Especial e A. A Tabela 2.2 apresenta o resumo dos resultados obtidos no segundo cenário [10]. A perda de capacidade causada pela interferência da TV Digital Classe B está situada abaixo do limiar de perda, de acordo com resultados obtidos em [10]. Apesar de ocorrer uma interferência pequena, o sistema LTE poderá apresentar um desempenho satisfatório no canal adjacente a TV Digital Classe B. Os resultados mostraram também que o aumento da largura de banda do sistema LTE reduz significativamente os impactos causados pela interferência da TV Digital Classes A e B. Já a TV Digital Classe C causa perda de capacidade do canal LTE sempre nula, ou seja, não deverá provocar interferência no LTE.

Tabela 2.2: Resultados da perda da capacidade do sistema LTE provocada pela TV Digital (Classes Especial, A, B e C) [10]

Sistema interferente	Sistema vítima	Largura de banda (MHz)	Perda da capacidade (1 km)	Alcance do limiar (43,2%)	Distância de proteção
TV Digital	Especial	5	100%	5,5 km	10 km
	A		93%	2 km	6 km
	B		12%	< 1 km	3 km
	C		0%	0	0
	Especial	10	100%	4,8 km	9,3 km
	A		70%	1,8 km	4,5 km
	B		7%	< 1 km	2,8 km
	C		0%	0	0
	Especial	20	100%	4,8 km	9 km
	A		54%	1,3 km	3 km
	B		6%	< 1 km	2 km
	C		0%	0	0

A taxa de dados do sistema LTE com largura de banda de 20 MHz, obtida na simulação, foi de 88,0428 Mbps. Segundo [10], o limiar da perda de capacidade do sistema LTE, com largura de banda de 20 MHz, é determinado em relação ao valor da taxa de dados cujo valor teórico é de 50 Mbps que corresponde a 56,8% da taxa de dados obtida nas simulações, em condições ideais. Nas simulações, o sistema LTE operou em condições ideais, ou seja, não sofreu interferências externas. Assim, a perda de capacidade do canal do sistema LTE, na presença da interferência, foi de 43,2%. Esse valor foi considerado como o limiar da perda de capacidade do canal do sistema LTE.

O estudo [10] concluiu que apesar da interferência que um sistema poderá provocar no outro, a coexistência de ambos na faixa de 700 MHz é possível, desde que bandas de guarda e distâncias de separação adequadas sejam respeitadas de acordo com os resultados obtidos.

2.4. Trabalhos do GSMA

O grupo GSMA [35] usou um modelamento para avaliar a coexistência dos sistemas de TV (analógica e digital) e LTE no Brasil. Eles consideraram os seguintes cenários [35]:

- Interferência do LTE BS nos receptores *rooftop* fixos ISDB-T,
- Interferência do LTE U.E. nos receptores *rooftop* fixos ISDB-T,
- Interferência do sistema ISDB-T no LTE U.E.,
- Interferência do sistema ISDB-T no LTE BS,
- Interferência do LTE BS na TV analógica,
- Interferência do LTE U.E. na TV analógica,
- Interferência da TV analógica no LTE BS,
- Interferência da TV analógica no LTE U.E..

Na metodologia para o primeiro cenário, foi utilizada uma ferramenta de planejamento com dados geoespaciais para modelar a interferência e a população afetada em três áreas: São Paulo, Brasília e Campinas. Essa ferramenta, desenvolvida pela empresa ATDI que é líder global no desenvolvimento e implementação de sistemas de gestão espectral, se baseou em documentos do ITU e dados da ANATEL. No modelamento da rede LTE, foram usadas características

típicas de transmissão em conjunto com uma rede representativa baseada nas localizações atuais das BS's em cada área. Para o sistema ISDB-T, também foi utilizada uma rede representativa baseada em estações existentes e futuras, que surgirão com o dividendo digital. Nos cenários restantes foi usado o parâmetro da perda mínima de acoplamento (MCL - *Minimum Coupling Loss*), que determina a separação mínima necessária por percurso, de modo a não sofrer interferência [35]. O parâmetro MCL é usado no planejamento do espectro e representa a menor perda de propagação que pode ocorrer entre o transmissor e o receptor. Na interferência do sistema LTE no receptor de TV Digital, operando em bandas adjacentes, o MCL é o menor valor possível pelo qual o sinal do U.E. pode ser atenuado levando à máxima potência, desde que não cause interferência em outro sistema.

O estudo também considerou dois mecanismos de interferência [35]: (1) fora de faixa (OOB - *Out-of-Band*) que ocorre quando os sinais indesejados vindos de canais adjacentes são capturados pelo receptor, causando interferência e impedindo-o de decodificar o sinal desejado e (2) bloqueio, que é um sinal indesejado forte que impede o receptor de detectar o sinal desejado, sobrecarregando-o.

Os resultados do estudo de cada cenário estão resumidos na Tabela 2.3 [35].

Tabela 2.3: Resultados do modelamento para avaliar a coexistência dos sistemas de TV e LTE realizados pelo GSMA [35]

Cenários	Resultados
LTE BS em ISDB-T	A população afetada pela interferência OOB é relativamente baixa com menos de 50 mil (considerando 50% dos locais), tipicamente, para São Paulo e menos de 10 mil para Brasília e Campinas. Utilizando técnicas de mitigação, estes números poderiam ser praticamente eliminados.
ISDB-T em LTE BS	As distâncias de separação necessárias podem ser reduzidas de mais de 10 km para um valor abaixo de 600 m após a mitigação.
LTE BS em TV analógica	A distância de separação necessária é, tipicamente, de alguns quilômetros. Para o <i>uplink</i> , a distância de separação necessária é, geralmente, menor do que 100 m.
TV analógica em LTE BS	A distância de separação necessária é muito maior do que 10 km, após a mitigação pode ser menor do que 10 km. Para o LTE U.E., a distância de separação necessária é da ordem de 10 km.

Segundo [35], as técnicas de mitigação mais vantajosas são: a introdução de (1) filtros de emissão e recepção no LTE BS e (2) filtros de emissão no transmissor ISDB-T, combinados com o controle da potência transmitida dos canais de TV. Apesar destas técnicas apresentarem os melhores benefícios quanto

à redução da probabilidade de interferência, o uso de filtros é a opção mais dispendiosa.

Outros estudos de interferência e medidas foram concluídos na região 1 da ITU [35], onde o desligamento da TV analógica já foi concluído em vários países europeus. O padrão de televisão escolhido na região 1 é o DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*), diferente da região 2 (Brasil) que é o ISDB-T, mas as contribuições recentes da ITU, especialmente o documento 146-E (JTG 4-5-6-7), sugeriram que os limiares de proteção e *overload* para o ISDB-T são semelhantes ao DVB-T e os estudos de compatibilidade para o DVB-T também podem ser aplicados ao ISDB-T, desde que sejam usados parâmetros específicos deste padrão [35].

3

Campanha de medições

Com a evolução dos sistemas de comunicações móveis de banda larga e digitalização de canais da televisão aberta brasileira, o estudo de coexistência entre os serviços operando em canais adjacentes na banda de 700 MHz representa um importante desafio e exige esforços para o desenvolvimento de soluções viáveis. É necessário que o país tenha uma boa gestão espectral, para garantir que o espectro que deixa de ser utilizado pelos serviços de radiodifusão seja usado de forma eficiente por sistemas móveis de transmissão de dados, que apresentam uma demanda explosiva.

A realização de testes de campo nas condições brasileiras, considerando a dimensão geográfica do país, é importante para conhecer e definir parâmetros técnicos e operacionais que conduzirão à convivência entre os sistemas LTE e TV Digital, bem como para elaborar um conjunto de normas e requisitos que possam evitar ou solucionar possíveis interferências. Mesmo que esses testes sejam ajustados para a realidade brasileira, é importante utilizar as especificações internacionais como fundamento principal. Com base nestas premissas foi realizada uma campanha de medições em um ambiente controlado no INMETRO, que avaliou a interferência e a convivência entre o serviço de radiodifusão de sons e imagens do SBTVD (padrão ISDB-T_B) e o LTE na faixa de 700 MHz. Na campanha foram utilizados equipamentos de tecnologia LTE e de TV Digital comerciais, com parâmetros referentes aos padrões de cada tecnologia, como máscaras de transmissão, critérios de proteção e limiares de recepção. Este conjunto de resultados medidos permite avaliar a interferência entre ambos os sistemas e validar simulações de cenários mais complexos que ocorrem em situações reais.

3.1.

Cenários de interferência entre sistemas de TV Digital e LTE

Vários cenários de interferência entre os sistemas de TV Digital e LTE foram avaliados, considerando a variação da interferência em canal adjacente com a distância e posição relativa entre os dispositivos referentes a cada sistema.

A separação de frequências entre os sistemas pode variar de acordo com diferentes cenários, com base no plano de espectro do dividendo digital. No caso da ERB LTE, existe uma separação mínima de 60 MHz para o início da faixa de frequência de recepção do sistema ISDB-T_B, conforme a Figura 3.1. Neste caso, o LTE *downlink* (LTE DL) não deve causar interferência prejudicial na TV Digital, devido à separação em frequência. Ainda assim, esta hipótese deve ser confirmada por medições.

Existe, ainda, e, principalmente, a necessidade de se avaliar a interferência potencial causada pelo LTE *uplink* (LTE UL) nos canais 49, 50 e 51 de TV Digital que estão mais próximos do LTE UL (703 a 748 MHz). A banda de guarda entre o canal mais alto de TV e o canal mais baixo do LTE é de apenas 5 MHz.

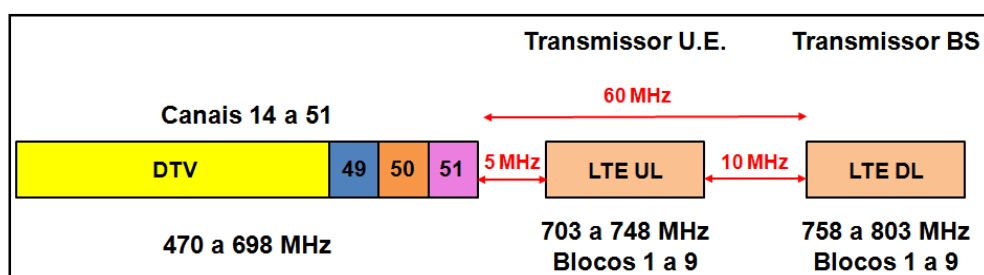


Figura 3.1: Plano de espectro do dividendo digital [35]

Nas medições em campo foi assumido que o LTE opera em canais adjacentes à TV. As máscaras de emissão do transmissor (ERB) e do receptor (equipamento móvel) foram levadas em consideração. A Tabela 3.1 indica os testes de interferências realizados em campo e mostra os canais do sistema interferente e sistema vítima de acordo com os cenários avaliados. A interferência foi medida entre os canais de TV 49, 50 e 51, que são os correspondentes adjacentes inferiores à faixa de *uplink*, da canalização banda 28 do 3GPP, e os blocos de *uplink* e *downlink* do LTE. O pior cenário ocorre quando a interferência é avaliada entre o canal 51 de TV e o bloco LTE UL, devido à separação mínima de frequência com base no plano de espectro.

Tabela 3.1: Cenários de interferências para avaliar a coexistência dos sistemas LTE e TV Digital

Sistema Interferente	Frequência central [MHz]	Largura de faixa [MHz]	Sistema vítima	Frequência central [MHz]	Largura de faixa [MHz]
LTE UL	705,5	5	TVD ch 49 64-QAM	683,142857	6
LTE UL	705,5	5	TVD ch 50 64-QAM	689,142857	6
LTE UL	705,5	5	TVD ch 51 64-QAM	695,142856	6
LTE UL	705,5	5	TVD ch 49 QPSK	683,142857	6
LTE UL	705,5	5	TVD ch 50 QPSK	689,142856	6
LTE UL	705,5	5	TVD ch 51 QPSK	695,142856	6
LTE DL	760,5	5	TVD ch 49 64-QAM	683,142857	6
LTE DL	760,5	5	TVD ch 50 64-QAM	689,142856	6
LTE DL	760,5	5	TVD ch 51 64-QAM	695,142856	6
LTE DL	760,5	5	TVD ch 49 QPSK	683,142857	6
LTE DL	760,5	5	TVD ch 50 QPSK	689,142856	6
LTE DL	760,5	5	TVD ch 51 QPSK	695,142856	6
TVD ch 49 64-QAM	683,142857	6	LTE UL	705,5	5
TVD ch 49 64-QAM	683,142857	6	LTE DL	760,5	5
TVD ch 50 64-QAM	689,142856	6	LTE UL	705,5	5
TVD ch 50 64-QAM	689,142856	6	LTE DL	760,5	5
TVD ch 51 64-QAM	695,142856	6	LTE UL	705,5	5
TVD ch 51 64-QAM	695,142856	6	LTE DL	760,5	5

3.2.

Descrição do sistema de medição

As medições foram realizadas no prédio 6 e na área de estacionamento do INMETRO, conforme a Figura 3.2. O local escolhido é de topografia pouco acidentada e com poucas edificações altas. A localização dos equipamentos para o teste de interferência é descrita a seguir.



Figura 3.2: Vista aérea do pátio do INMETRO (Google Earth)

A Figura 3.3 e a Figura 3.4 apresentam as posições da antena transmissora do sinal de TV Digital (Tx TV), do *eNodeB* e do receptor de TV Digital (Rx TV). A antena transmissora de TV Digital foi instalada no telhado do prédio 6, a 15 metros de altura, e o gerador e amplificador RF (Figura 3.5) estão localizados no auditório do prédio 6.

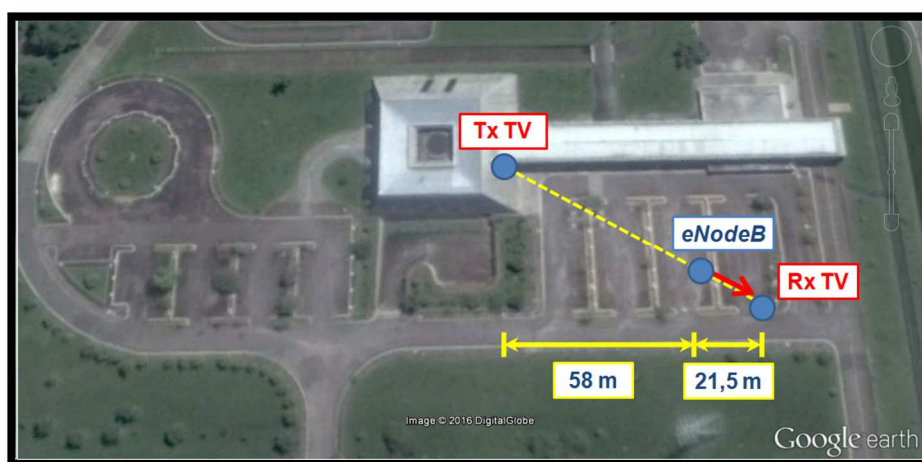


Figura 3.3: Vista aérea da posição dos equipamentos de medição de interferência LTE em TV Digital

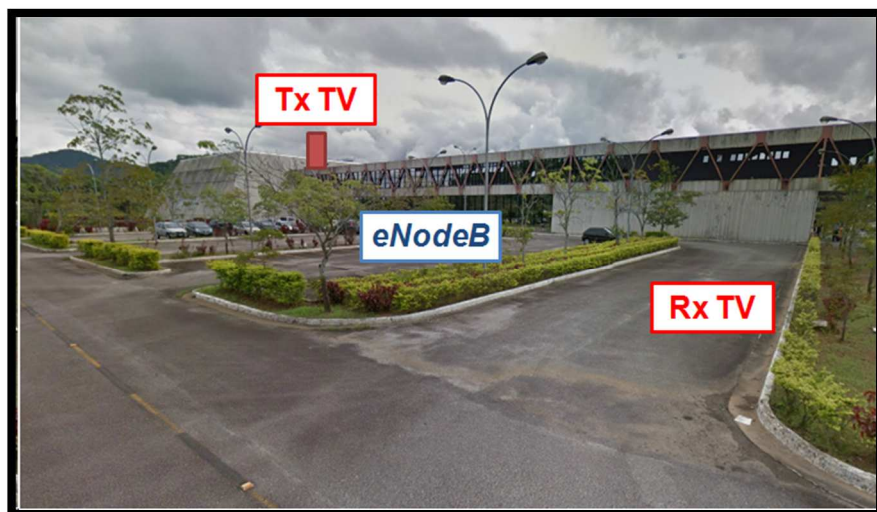


Figura 3.4: Vista do estacionamento onde foram realizadas medições de interferência LTE no receptor de TV Digital

O sinal de TV Digital foi recebido por uma antena log-periódica (Figura 3.6), conectada diretamente a um receptor de TV. A distância de separação dos sistemas de transmissão e recepção de TV Digital foi, aproximadamente, igual a 80 metros [12].

A configuração usada para o teste de interferência do sistema de TV Digital sobre o sistema LTE é apresentada na Figura 3.7 e na Figura 3.8. A posição do transmissor de TV Digital é a mesma do caso anterior, e o *eNodeB* foi posicionado próximo à entrada lateral do prédio 6.



Figura 3.5: Gerador de sinal de TV Digital e amplificador RF



Figura 3.6: Posição dos elementos de ambos os sistemas

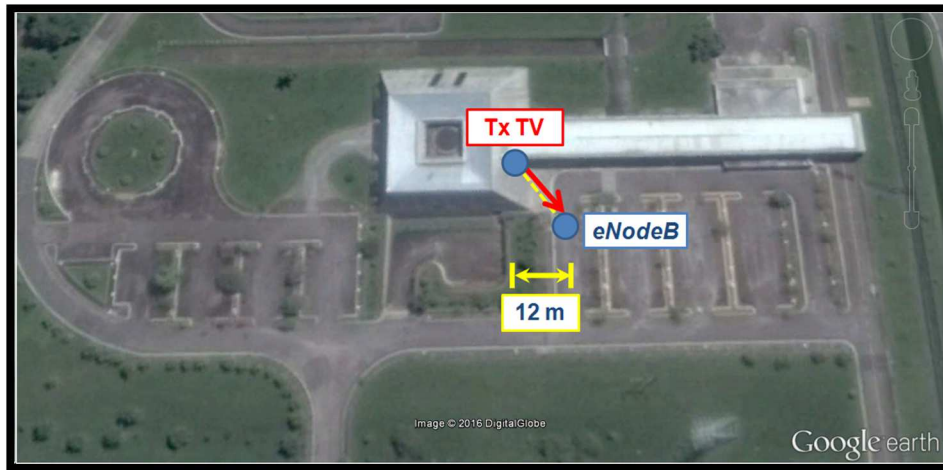


Figura 3.7: Vista aérea da posição dos equipamentos de medição de interferência TV Digital em LTE

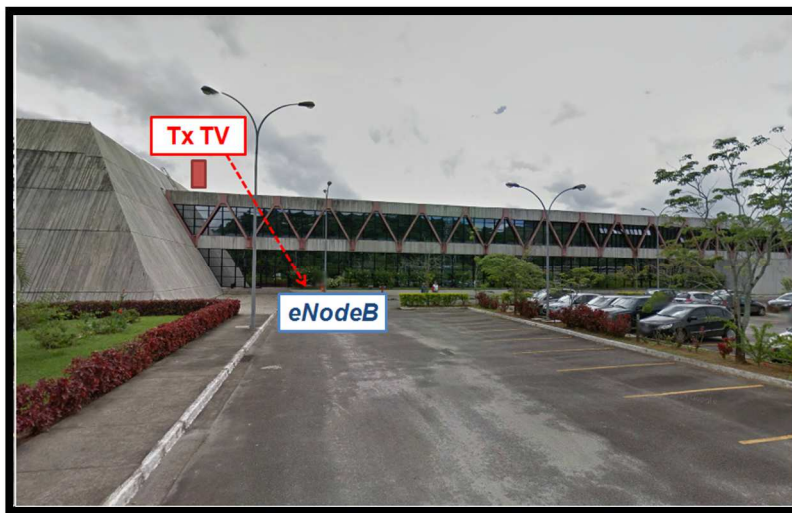


Figura 3.8: Posição dos equipamentos de medição de interferência TV Digital em LTE

A Figura 3.9 apresenta o posicionamento da antena de TV, apontada em direção à antena LTE, de modo a verificar a interferência do sistema de TV Digital sobre o sistema LTE. A distância entre os sistemas foi de 12 metros. A antena do sistema LTE foi instalada no mastro extensível da van, a 8 metros de altura, como mostra a Figura 3.10. A instalação do equipamento *eNodeB* e a U.E., no interior da van, é apresentada na Figura 3.11 e na Figura 3.12, respectivamente. O veículo utilizado foi uma van adaptada com mastro pneumático e sistema de energia para alimentação dos equipamentos.



Figura 3.9: Posição das antenas transmissoras de sinais de TV Digital e de LTE



Figura 3.10: Antena do sistema LTE instalada no mastro da van

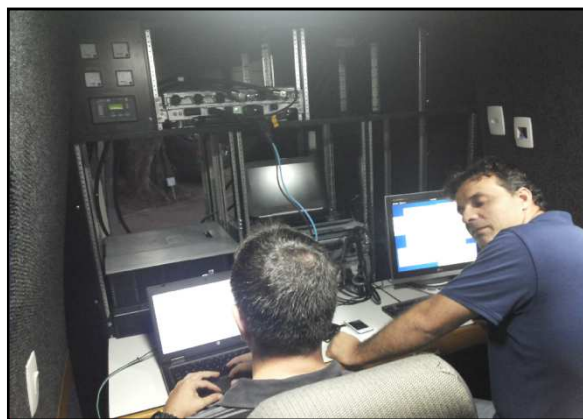


Figura 3.11: *eNodeB* localizado na parte interna da van



Figura 3.12: U.E. no interior da van

3.2.1.

Sistema de medição de interferência LTE na TV Digital

Conforme a posição dos equipamentos indicada na Figura 3.3 e na Figura 3.4, foi avaliada a interferência do *eNodeB* e U.E. em receptores de TV Digital (canais 49, 50 e 51). Diferentes configurações de *setup* foram realizadas.

A primeira configuração realizada é de interferência de LTE DL e está indicada na Figura 3.13. O objetivo foi verificar o nível de sinal de TV Digital recebido e a qualidade do sinal de vídeo, na presença da transmissão do equipamento *eNodeB*. Neste teste, a van, juntamente com o *eNodeB*, ficaram localizadas entre a antena de TV e o sistema vítima, conforme configuração da Figura 3.6.

O sinal de TV foi recebido por uma antena veicular omnidirecional de base magnética, conectada diretamente a um analisador de espectro portátil, o qual fornecia o nível de sinal recebido, como ilustrado na Figura 3.13.

A segunda configuração é de interferência do LTE UL. O objetivo do *setup* da Figura 3.14 é verificar o nível de sinal de TV Digital recebido e a qualidade do sinal de vídeo, na presença do equipamento U.E., localizado em duas posições: ao lado da antena log-periódica recebendo sinal do canal 51 e em frente à antena quando está recebendo sinais nas frequências dos canais 49, 50 e 51. Sua montagem é referente à configuração da Figura 3.6.

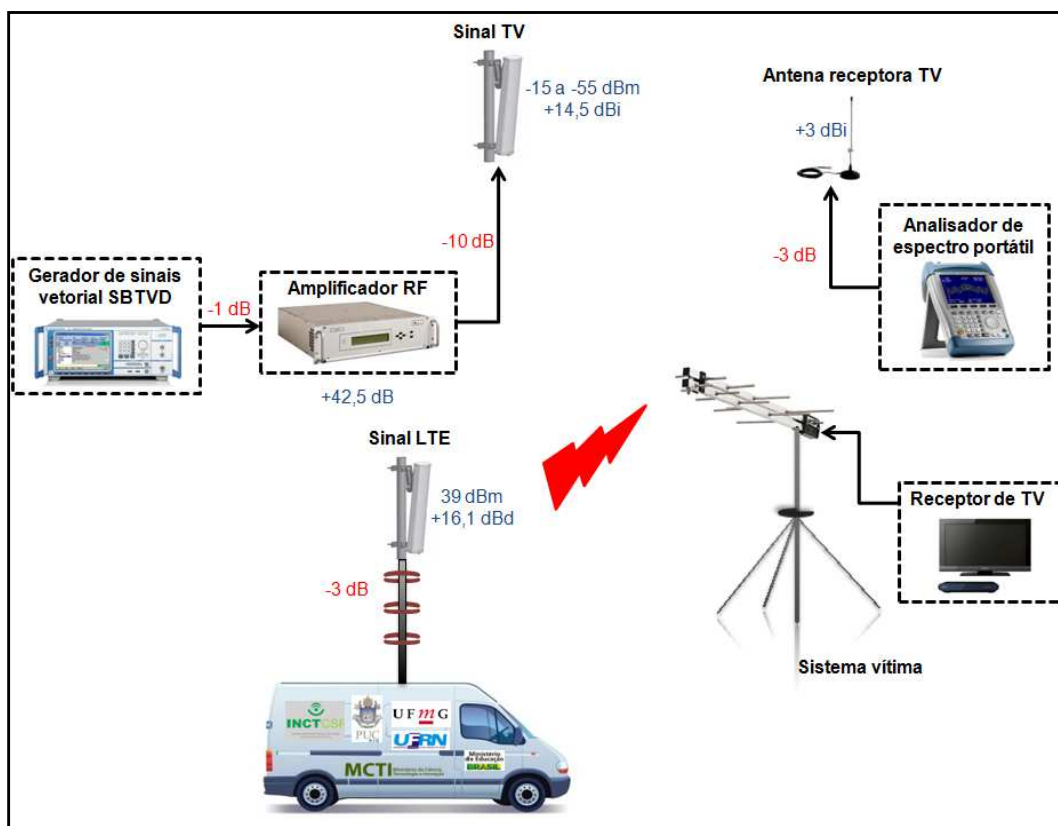


Figura 3.13: *Setup* de medição de interferência LTE em TV Digital (canal 51) com *eNodeB* e U.E. operando dentro da van

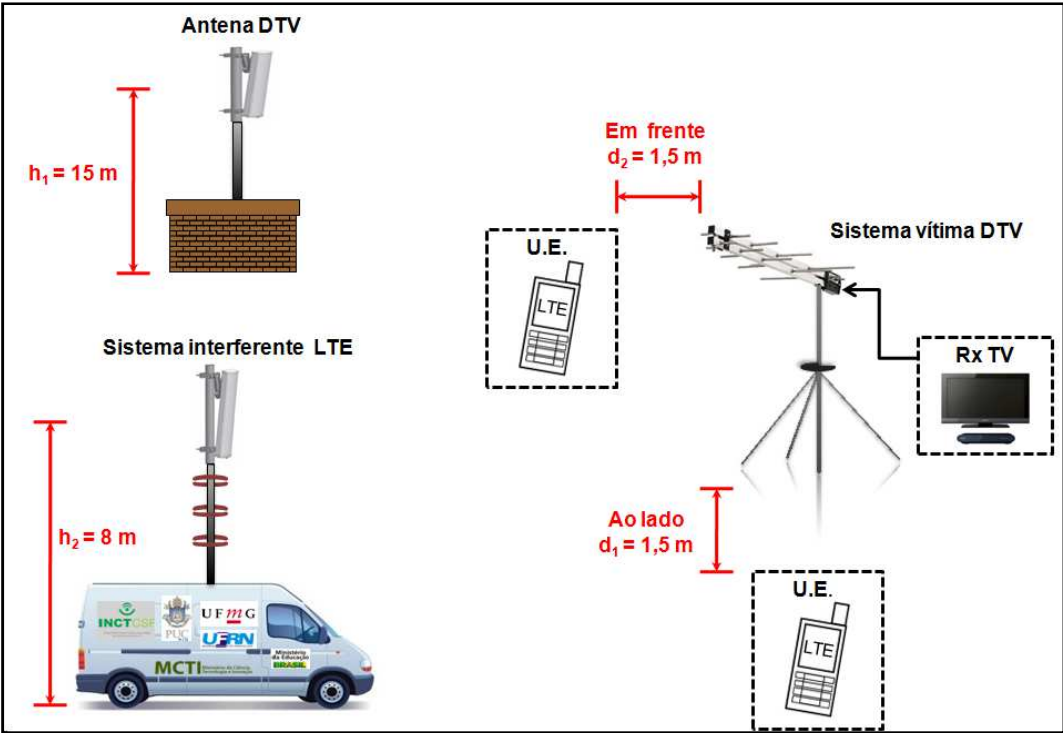


Figura 3.14: Setup de medição de interferência LTE em TV Digital (canais 49, 50 e 51) com eNodeB e U.E. operando fora da van

Na campanha de medições da interferência do sistema LTE na TV Digital, foram realizados sete testes com diferentes cenários durante dois dias, de acordo com a disponibilidade dos equipamentos que eram, em grande parte, alugados. A Tabela 3.2 apresenta o planejamento dos testes durante os dois dias programados. Os testes, com seus respectivos resultados, serão apresentados na seção 3.4.

Tabela 3.2: Planejamento dos testes de interferência LTE na DTV

Dia 1 - medição no canal de TV 51		Dia 2 - medição nos canais de TV 49 e 50	
Teste 1 Teste 2 Teste 3 Teste 4 Teste 5	Uso de receptor de TV que opera no modo <i>full-seg</i> (Sony) e de mais um receptor <i>one-seg</i> com entrada USB conectado ao <i>laptop</i>	Teste 1 Teste 2	Uso de receptor de TV que opera em ambos os modos: <i>full-seg</i> e <i>one-seg</i> (Telesystem)
		Teste 3 Teste 4	Não mediu
		Teste 5	Uso de receptor de TV que opera em ambos os modos: <i>full-seg</i> e <i>one-seg</i> (Telesystem)
Teste 6 Teste 7	Uso de receptor de TV que opera em ambos os modos: <i>full-seg</i> e <i>one-seg</i> (Telesystem)	Teste 6 Teste 7	Não mediu

3.2.2.

Sistema de medição de interferência TV Digital em LTE

A interferência do sistema de TV Digital no sistema LTE foi avaliada com os parâmetros de recepção *uplink* fornecidos pelo equipamento *eNodeB*. As medições realizadas foram as seguintes [12]:

(a) Na configuração das Figura 3.7 e Figura 3.8, esquematizada nas Figura 3.15 e Figura 3.16, o sistema vítima é o LTE UL, ou seja, o terminal do usuário, o U.E. foi posicionado na portaria principal do prédio 6 (Figura 3.2). Foram registrados valores de potência recebida do sinal de TV, tanto próximo ao U.E. quanto próximo à *eNodeB*, com analisador portátil. Foram registrados parâmetros de recepção do LTE UL fornecidos pelo *eNodeB*.

(b) Mesma medição realizada com U.E. em outra posição, que foi no corredor do prédio 6, conforme a Figura 3.16.

(c) Medição de LTE UL com U.E. afastado do *eNodeB*, este localizado na rotatória, próximo ao prédio 6 (Figura 3.17). O U.E., na posição indicada, recebe interferência diretamente do sinal de TV.

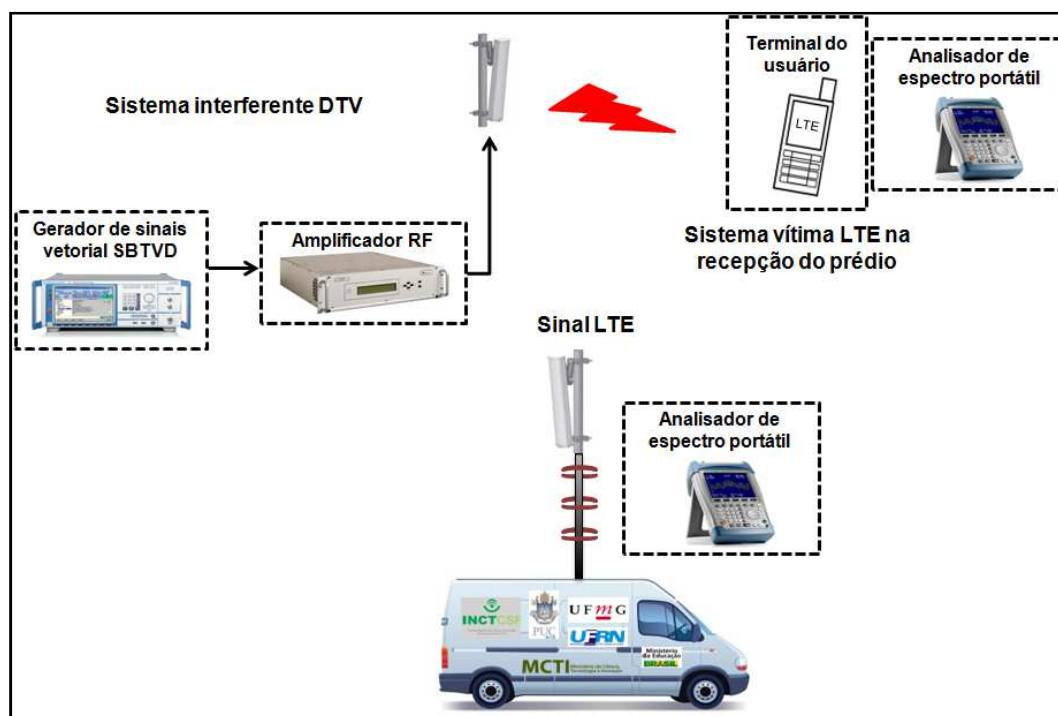


Figura 3.15: Setup de medição de interferência de TV Digital em LTE. O nível de sinal de TV é medido junto ao U.E. e *eNodeB* [12]

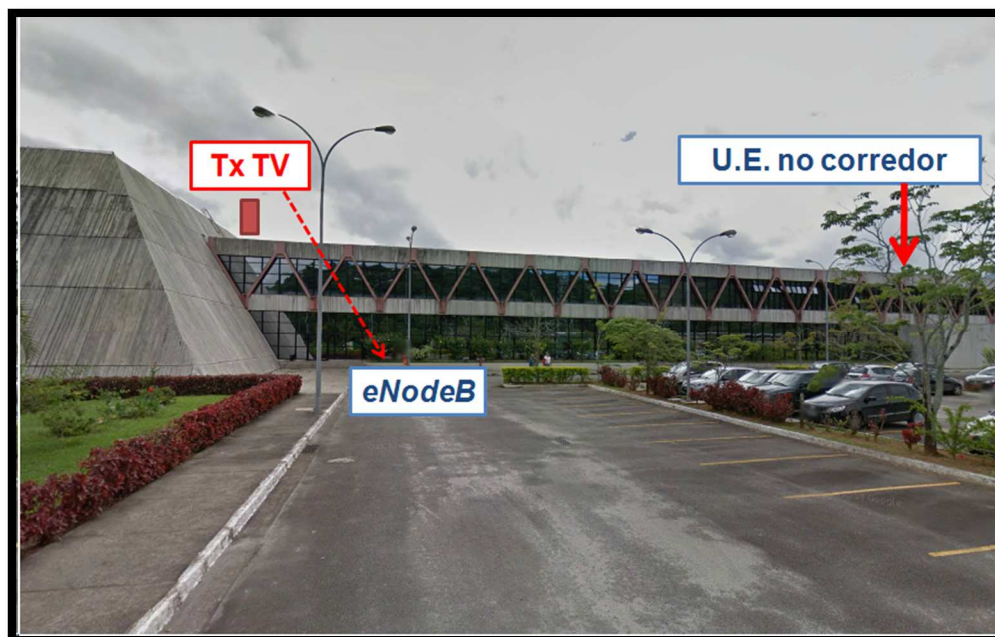


Figura 3.16: Interferência do sistema de TV Digital no *eNodeB* e U.E. localizado no final do corredor do prédio 6 [12]

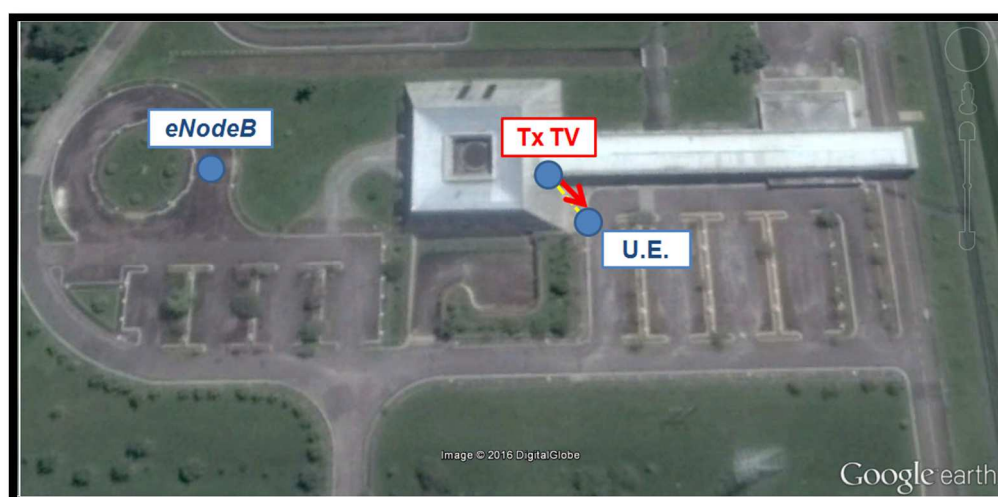


Figura 3.17: Interferência do sistema de TV Digital no U.E. e *eNodeB* localizado na rotatória [12]

Na campanha de medições de interferência da TV Digital no sistema LTE, foram realizados seis testes com diferentes cenários durante dois dias, de acordo com a disponibilidade dos equipamentos que eram, em grande parte, alugados. A Tabela 3.3 apresenta o planejamento dos testes durante os dois dias programados. Os testes, com seus respectivos resultados, serão apresentados na seção 3.5.

Tabela 3.3: Planejamento dos testes de interferência DTV no LTE

Dia 1 - medição nos canais de TV 49, 50 e 51	Dia 2 - medição no canal de TV 51
Teste 1	Teste 5
Teste 2	Teste 6
Teste 3	-
Teste 4	-

3.3. Metodologia de testes

A interferência do sistema LTE, nos sentidos de *downlink* e *uplink*, em receptores de TV Digital foi avaliada através da análise subjetiva da imagem e ocorrência de artefatos (pixelização ou congelamento), conforme critérios estabelecidos na Rec. ITU-R 2035 [11].

O sinal de TV Digital desejado pode ser ajustado em quatro níveis diferentes: muito forte (-15 dBm), forte (-28 dBm), moderado (-53 dBm) e fraco (-68 dBm). O nível de ruído deve ser aumentado até que o limite de visibilidade (TOV - *Threshold of Visibility*) na imagem de TV Digital seja alcançado. Nas medições em campo, o ponto em que o observador for capaz de detectar algum tipo de distorção ou defeito na imagem do aparelho de TV, durante o período de observação de um minuto, é conhecido como valor de TOV. Nas medições de interferência do sinal de LTE DL e LTE UL, em receptores de TV Digital, foram coletados os seguintes parâmetros [12]:

- (a) potência recebida do sinal de TV Digital e *eNodeB* no analisador de espectro portátil localizado próximo ao receptor de TV;
- (b) qualidade do sinal de vídeo nos modos *full-seg* (alta definição) e *one-seg* (definição padrão) através da observação da imagem por um minuto.

Nas medições de interferência do sinal de TV Digital no LTE foram coletados parâmetros de avaliação de desempenho da rede LTE: vazão, *jitter*, perda de pacotes com observação da variação da potência de transmissão do U.E. e nível de sinal recebido (RSRP - *Reference Signal Received Power*) do *eNodeB* no U.E. [12]. Esses parâmetros foram coletados pela ferramenta Iperf que foi usada para analisar o desempenho da banda e calcular a perda de pacotes na rede LTE. A vazão (*throughput*) é a taxa ou a velocidade de transmissão que representa a quantidade de dados que podem ser transferidos da fonte de transmissão ao destino, com sucesso, em períodos de tempo determinados. Sua unidade é o bit

por segundo (bps). Quando os pacotes de dados são enviados e recebidos, existe uma variação do atraso entre eles. Essa variação é o *jitter* (atraso) que representa um parâmetro importante de análise da rede. Altos valores de *jitter* podem levar a um valor de QoS baixo. A perda de pacotes é a percentagem de pacotes que são perdidos durante a transmissão da fonte ao destino através da rede, devido ao seu congestionamento ou à variação das rotas por onde trafegam os dados [37].

3.4.

Medidas de interferência do sistema LTE na TV Digital

Os resultados detalhados das medições de interferência do sistema LTE na TV Digital e os parâmetros dos *setups* podem ser encontrados no Anexo A. Em seguida, serão descritos os vários testes de interferências.

A Tabela 3.4 reúne os testes que serão descritos nos próximos itens e suas características.

Tabela 3.4: Resumo dos testes realizados na medição

Número do teste	Descrição	Objetivo	Obs.
Teste 1	Sem <i>eNodeB</i> operando	Medir nível de sinal de TV recebido	-
Teste 2	<i>eNodeB</i> com 39 dBm, sem U.E. operando (DL <i>idle</i>)	Medir interferência de LTE DL no receptor de TV	-
Teste 3	<i>eNodeB</i> com 39 dBm e U.E. no interior da van	Medir interferência LTE DL no receptor de TV	U.E. ligado, mas posicionado fora do lóbulo principal da antena do <i>eNodeB</i>
Teste 4	<i>eNodeB</i> com 39 dBm e U.E. ao lado da antena log-periódica (1,5 m)	Medir interferência LTE UL no receptor de TV	-
Teste 5	<i>eNodeB</i> com 39 dBm e U.E. em frente à antena log-periódica (1,5 m)	Medir interferência LTE UL no receptor de TV	-
Teste 6	<i>eNodeB</i> com 46 dBm e U.E. em frente à antena log-periódica (1 m)	Medir interferência LTE UL no receptor de TV	-
Teste 7	<i>eNodeB</i> com 46 dBm e U.E. em frente à antena log-periódica (1 m)	Medir interferência LTE UL no receptor de TV	-

3.4.1.

Testes de interferência do LTE na TV Digital

(a) Teste 1: Sem *eNodeB* operando

O objetivo deste *setup* foi verificar o nível de sinal de TV Digital recebido no seu sistema de recepção, sem a presença do equipamento *eNodeB*. Desta

maneira, será possível ter uma referência para verificar o quão afetado será o sistema vítima (TV) na presença dos equipamentos LTE.

Para medir o nível de sinal de TV nos receptores, usando um analisador de espectro portátil conectado junto a uma antena omnidirecional, o *eNodeB* foi desligado. O nível de sinal do gerador de TV (sinal desejado) foi reduzido até atingir o piso de ruído, com o seu sinal sendo recebido por um receptor *one-seg* de computador (Figura 3.18) e, também, por uma antena log-periódica conectada a um receptor *full-seg* (Figura 3.19). O limiar de percepção é definido pelo menor sinal que permite um minuto contínuo de observação da sequência recebida, sem a verificação de artefatos (bloqueio e congelamento da imagem). O aparelho de TV conectado ao seu receptor foi utilizado para observar a qualidade do sinal recebido, como mostra a Figura 3.19 [12]. O teste foi feito para os canais 49, 50 e 51 e os resultados podem ser observados na Tabela 3.5.

Para os canais 49 e 50, foi utilizado um receptor de TV que funciona nos modos *one-seg* e *full-seg*, simultaneamente. Para o canal 51, exceto Testes 6 e 7, foi utilizado um receptor com entrada USB conectado ao *laptop*, que recebe sinais no modo *one-seg* e outro receptor que opera apenas no modo *full-seg*. De acordo com os resultados da Tabela 3.5, o receptor do canal 51 apresentou sensibilidade menor em relação ao receptor dos canais 49 e 50.



Figura 3.18: Avaliação do nível de potência do sinal de TV Digital (modo *one-seg*) [12]



Figura 3.19: Avaliação do nível de potência do sinal de TV Digital (modo *full-seg*) [12]

Tabela 3.5: Medidas obtidas nos canais 49, 50 e 51 referentes ao Teste 1

Canais	49		50		51	
Modos	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>
EIRP TV	-5 dBm		-5 dBm		-9 dBm	-6 dBm
Limiar de boa recepção	Perdeu sinal em -77,4 dBm	-77,2 dBm	Perdeu sinal em -77,4 dBm	-77,2 dBm	Defeito em -91,4 dBm	Perdeu sinal em -90 dBm
Piso de ruído	-77,2 dBm		-77,2 dBm		-93,8 dBm	

(b) Teste 2: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando com potência de transmissão em 39 dBm, sem o U.E. operando (*downlink* em modo *idle*)

Para medir o nível de interferência do sinal de LTE *downlink* (sem presença do U.E.) sobre o sinal de TV nos seus receptores, o *eNodeB* foi ligado com potência de transmissão de 39 dBm.

Nos resultados do Teste 2 (Tabela 3.6) é possível observar que o *eNodeB* não gerou perturbação significativa nos canais 49 e 50, pois os limiares de recepção não foram modificados quando comparados com os resultados do Teste 1, Tabela 3.5.

Já para o canal 51, a Tabela 3.6 mostra que os receptores *full-seg* e *one-seg* apresentaram limiares de recepção acima dos obtidos no Teste 1, ou seja, com o *eNodeB* ativo houve um aumento de 12,5 dB no limiar de recepção no modo *full-seg* e 21,2 dB no modo *one-seg* [12].

Tabela 3.6: Medidas obtidas nos canais 49, 50 e 51 referentes ao Teste 2

Canais	49		50		51	
Modos	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>
EIRP TV	-5 dBm		-5 dBm		-9 dBm	6 dBm
Limiar de boa recepção	Perdeu sinal em -77,4 dBm	-77,2 dBm	Perdeu sinal em -77,4 dBm	-77,2 dBm	Defeito em -78,9 dBm	Perdeu sinal em -68,8 dBm
Piso de ruído	-77,2 dBm		-77,2 dBm		-78,9 dBm	

Comparando os resultados dos Testes 1 e 2 verifica-se que:

- O piso de ruído do canal 51 no modo *full-seg* sobe, aproximadamente, 15 dB quando o *eNodeB* é ligado na direção da antena receptora de TV,
- O limiar do canal 51 no modo *full-seg* subiu 12,5 dB,
- Os limiares de recepção do canal 51 no Teste 1 e Teste 2, em modo *full-seg*, foram atingidos para EIRP de -9 dBm,

Já para os canais 49 e 50 os limiares de recepção não se alteram, não se observando efeitos significativos de interferência.

(c) Teste 3: Interferência em TV Digital com o U.E. operando no interior da van

O nível de interferência do sinal de LTE *downlink* (*eNodeB* com 39 dBm) sobre o sinal de TV foi avaliado na presença do U.E. localizado na parte interna da van, conforme a Figura 3.12. O objetivo era fazer a conexão *eNodeB*-U.E., mas

com redução da interferência do U.E. Assim, o U.E. foi posicionado em local fora do lóbulo principal da antena do *eNodeB*. Esta configuração corresponde ao *setup* da Figura 3.13. Neste teste não houve outras modificações em relação às configurações anteriores [12]. Ao incluir o U.E. como interferente no ambiente, embora tenha sido minimizado, o piso de ruído também se elevou, conforme a Tabela 3.7. Para o canal 51, a potência requerida no receptor de TV no modo *full-seg*, passou de -78,9 dBm (Teste 2) para -76,5 dBm (Teste 3), um aumento de 2,4 dB. Já para o modo *one-seg*, o limiar de recepção foi 6,5 dB menor comparado com o Teste 2.

Tabela 3.7: Medidas obtidas no canal 51 referentes ao Teste 3

Canal	51	
Modos	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>
EIRP TV	-9 dBm	-4 dBm
Limiar de boa recepção	Defeito em -76,5 dBm	Perdeu sinal em -75,3 dBm
Piso de ruído	-76,5 dBm	

No Teste 3, com o U.E. dentro da van, não se observou interferência significativa no canal 51 e o comportamento observado foi mantido se comparado com os Testes 1 e 2. No modo *full-seg*, o limiar de recepção do canal 51 foi atingido para EIRP de -9 dBm e no *one-seg*, foi para EIRP de -4 dBm.

(d) Teste 4: Interferência em TV Digital com U.E. operando ao lado da antena log-periódica receptora do sinal de TV

O nível de interferência do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão de 23 dBm) sobre o sinal de TV foi avaliado na presença do U.E. localizado ao lado da antena de recepção de TV (log-periódica) com 1,5 metros de distância, conforme a Figura 3.14. Neste teste, não foi observada uma perturbação muito significativa do U.E.. Conforme a Tabela 3.8, o limiar no receptor de TV no modo *full-seg*, aumentou apenas 0,25 dB e no modo *one-seg* 1,6 dB, em comparação com o Teste 3. Também não houve variação significativa no piso de ruído.

Tabela 3.8: Medidas obtidas no canal 51 referentes ao Teste 4

Canal	51	
Modos	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>
EIRP TV	-9 dBm	6 dBm
Limiar de boa recepção	Defeito em -76,25 dBm	Defeito em -73,7 dBm
Piso de ruído	-76,25 dBm	

No Teste 4, com o U.E. ao lado da antena log-periódica de recepção, não houve alteração no canal 51 no modo *full-seg*, enquanto que para o receptor USB (modo *one-seg*), uma significativa degradação foi percebida. A imagem do sinal de TV, no modo *one-seg*, apresentou defeito mesmo com um valor de EIRP 10 dB maior do que a EIRP no Teste 3.

(e) Teste 5: Interferência em TV Digital com U.E. operando em frente à antena log-periódica receptora do sinal de TV

Conforme a Figura 3.14, o nível de interferência do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão de 23 dBm) sobre o sinal de TV foi avaliado na presença do U.E. localizado em frente à antena de recepção de TV (log-periódica) com 1,5 metros de distância (Figura 3.20 e Figura 3.21).



Figura 3.20: Posição do U.E. em frente à antena (1,5 m) [12]



Figura 3.21: Interferência do sinal LTE no sistema de TV Digital [12]

De acordo com a Tabela 3.9, este teste correspondeu ao pior cenário de interferência entre os sistemas, já que o sinal interferente U.E. está na direção de máximo ganho do diagrama de recepção da antena de TV. O limiar de recepção do sinal de TV no modo *full-seg* para os canais 49 e 50 aumentou 0,9 dB em relação ao Teste 2, em que apenas o sistema de TV e *eNodeB* estavam ligados. Já o limiar de recepção do sinal de TV no modo *full-seg*, no canal 51, aumentou 20,7 dB em relação ao Teste 4.

Outra observação é que o sinal de TV deixou de ser recebido para uma EIRP de 3 dBm na transmissão, ou seja, 12 dB acima do valor de EIRP mínima do Teste 4. No modo *one-seg*, o sinal de TV foi perdido para uma EIRP de 16 dBm, ou seja, 10 dB acima do valor de EIRP mínima do teste anterior.

Assim, foi verificada uma degradação das transmissões *full-seg* e *one-seg* com o equipamento da Sony e o receptor USB, respectivamente, para o canal 51. Não foram observados efeitos significativos de interferência nos canais 49 e 50.

Tabela 3.9: Medidas obtidas nos canais 49, 50 e 51 referentes ao Teste 5

Canais	49		50		51	
Modos	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>
EIRP TV	-5 dBm		-5 dBm		3 dBm	16 dBm
Limiar de boa recepção	Perdeu sinal em -76,5 dBm	-76,5 dBm	Perdeu sinal em -76,5 dBm	-76,5 dBm	Perdeu sinal em -55,55 dBm	Perdeu sinal em -65,4 dBm
Piso de ruído	-76,5 dBm		-76,5 dBm		-74,7	

(f) Teste 6: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando em 46 dBm

Mantendo a posição do *eNodeB*, conforme a Figura 3.4, o nível de interferência do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão de 23 dBm) sobre o receptor de TV foi avaliado na presença do U.E. localizado a um metro da antena log-periódica. Além disso, o *eNodeB* foi ligado com potência máxima de transmissão de 46 dBm. O receptor de TV utilizado nesta medição opera nos modos *one-seg* e *full-seg*, simultaneamente. No modo *one-seg*, os valores medidos não foram anotados. O nível do sinal de TV recebido, canal 51, pode ser observado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Medidas obtidas no canal 51 referentes ao Teste 6

Canal	51	
Modos	<i>Full-seg</i>	<i>One-seg</i>
EIRP TV	-2 dBm	
Limiar de boa recepção	Perdeu sinal em -72,2 dBm	Não mediu
Piso de ruído	-77,2 dBm	

No Teste 6, com o *eNodeB* configurado em potência máxima de 46 dBm, com o receptor da Telesystem, modelo TS2400, utilizado para os modos *one-seg* e *full-seg*, observa-se que o limiar no canal 51 ocorreu para EIRP de -2 dBm, menor que o ocorrido no Teste 5 com outro receptor, com EIRP de 3 dBm.

(g) Teste 7: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando em 39 dBm

O nível de interferência do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão de 23 dBm) sobre o receptor de TV foi avaliado na presença do U.E. localizado a um metro da antena log-periódica. Além disso, o *eNodeB* foi ligado com potência de

transmissão de 39 dBm. O nível do sinal de TV recebido, canal 51, pode ser observado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Medidas obtidas no canal 51 referente ao Teste 7

Canal	51	
Modos	Full-seg	One-seg
EIRP TV	-4 dBm	
Limiar de boa recepção	Perdeu sinal em -74,4 dBm	-76,5 dBm
Piso de ruído	-76,5 dBm	

No Teste 7, a potência de transmissão do *eNodeB* foi reduzida para 39 dBm. Comparando-se o Teste 6 com o Teste 7, na situação com mais interferência (Teste 6), o limiar ficou mais alto que no Teste 7. Não houve alteração significativa no piso de ruído

É possível verificar que, mesmo numa situação de boa cobertura, os receptores de TV foram afetados quando há presença do U.E. em frente à antena de TV Digital. Numa situação de limiar de cobertura, será necessário obter critérios de proteção para garantir a qualidade do sinal no receptor [12].

3.5. Medidas de interferência do sistema de TV Digital em LTE

Os resultados detalhados das medições de interferência do sistema de TV Digital em LTE e os parâmetros dos *setups* de medidas podem ser encontrados no Anexo B. Em parte, as medições foram realizadas com transmissão de TV Digital nos canais 49, 50 e 51. Nos dois últimos testes, houve transmissão apenas no canal 51, devido à disponibilidade de equipamentos.

3.5.1. Testes de interferência da TV Digital no LTE

(a) Teste 1: Sem transmissão de TV Digital e U.E. dentro da van

A configuração para este teste é mostrada na Figura 3.8. Foram medidos os parâmetros do sinal LTE recebido pelo U.E. localizado no interior da van (Figura 3.22), com o sistema de TV desligado. Os resultados são apresentados na Tabela 3.12.



Figura 3.22: Ponto de recepção do sinal LTE e medição dos parâmetros de *uplink* do U.E. Figura 3.23: Ponto de transmissão do sinal LTE

Tabela 3.12: Parâmetros do sinal LTE do Teste 1

VAZÃO	JITTER	PERDA DE PACOTES	OBSERVAÇÃO
29,5 Mbps	0,436 ms	0%	*PUE = 8 dBm dentro da van

*Potência do U.E.

No Teste 1, quando o U.E. (dentro da van) e *eNodeB* (Figura 3.23) estão operando sem interferência do sistema de TV Digital, a taxa de transmissão foi de 29,5 Mbps, o *jitter* máximo de 0,436 ms e 0% de perda de pacotes.

(b) Teste 2: Com TV Digital nos canais 49, 50 e 51 e U.E. dentro da van

Os parâmetros do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão variável) foram medidos no equipamento do *eNodeB*. Além disso, o gerador de TV foi ligado para que o seu nível de sinal dentro da van e junto ao U.E. pudesse ser medido. O nível de sinal do gerador de TV (sinal interferente) foi variado até atingir o piso de ruído. Esta configuração corresponde ao *setup* do item anterior, representado pela Figura 3.24.



Figura 3.24: Pontos de transmissões dos sinais de TV Digital (antena vermelha) e LTE (antena branca)

No Teste 2, o U.E. opera dentro da van e quando é interferido pelo canal 51, com diferentes potências de transmissão da TV Digital, o seu desempenho se manteve com os valores de referência, ou seja, a taxa de transmissão permaneceu com valor de 29,5 Mbps, o *jitter* máximo foi de 0,4 ms e houve um evento no qual ocorreu perda de pacotes. Com a transmissão no canal 50, foi verificada uma diminuição da vazão para 27,4 Mbps, o *jitter* máximo foi de 0,3 ms e houve um evento no qual ocorreu uma pequena perda de pacotes com EIRP da TV em 31 dBm. No caso da transmissão com o canal 49, a taxa de transmissão foi de 29,5 Mbps. O *jitter* apresentou um valor médio de 0,26 ms e houve um evento com perda de pacote. Estes resultados estão apresentados nas Tabelas B.3, B.4 e B.5, no Anexo B.

(c) Teste 3: Sem TV Digital operando e U.E. na recepção do prédio

Para medir os parâmetros do sinal do U.E. localizado na entrada principal do prédio 6 (Figura 3.25) o sistema de TV Digital foi desligado. Esta configuração corresponde ao *setup* da Figura 3.15. Os resultados são apresentados na Tabela 3.13.

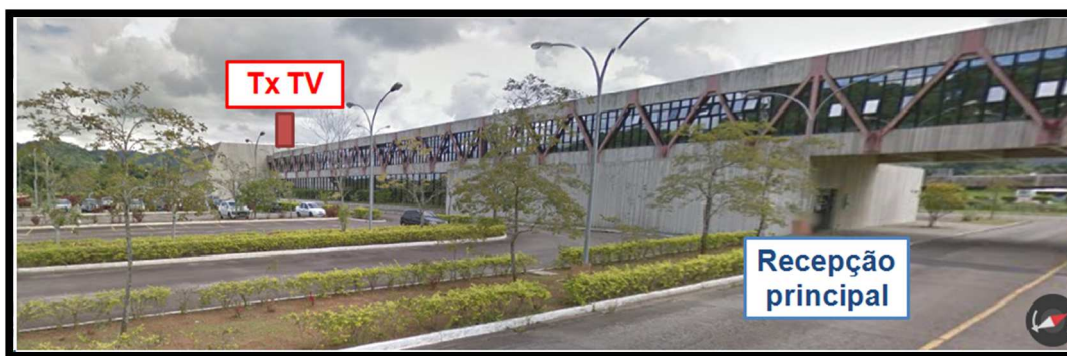


Figura 3.25: U.E. na recepção do prédio

Tabela 3.13: Parâmetros do sinal LTE do Teste 3

VAZÃO	JITTER	PERDA DE PACOTES	OBSERVAÇÃO
17 Mbps	0,8 ms	0,4%	PUE = 22-23 dBm

*Potência do U.E.

No Teste 3, ao desligar o sistema de TV Digital e deslocar o U.E. para uma região afastada do *eNodeB*, o valor da vazão do U.E. caiu para 17 Mbps, o *jitter* máximo aumentou para 0,8 ms e apresentou 0,4% de perda de pacotes.

(d) Teste 4: TV Digital nos canais 49, 50 e 51 e U.E. na recepção do prédio

Considerando o *setup* do item anterior, os parâmetros do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão variável) foram medidos no equipamento do *eNodeB*. O gerador de TV foi ligado para que o nível de sinal dentro da van e junto ao U.E. localizado na recepção principal do prédio 6 pudesse ser medido. Neste caso, foi observada uma queda na vazão do LTE se comparado com os resultados do caso anterior.

No Teste 4, ao avaliar o desempenho do LTE U.E., operando com potência máxima de transmissão na presença do sistema interferente de TV Digital e na condição de limite de cobertura, quando se encontra na recepção do prédio 6 e EIRP da TV em 31 dBm, foi verificada da mesma forma, redução da taxa de transmissão de 17 para 16 Mbps (canal 49), para 3 Mbps (canal 50) e para 1 a 2 Mbps para o canal 51, é possível perceber claramente o impacto no desempenho. Da mesma forma, o *jitter* e a perda de pacotes foram afetados. O *jitter* apresentou os seguintes valores: 2,5 ms (canal 49), 3 ms (canal 50) e 10-18 ms (canal 51). Houve um evento com perda de pacote no canal 51.

(e) Teste 5: Com TV Digital no canal 51 e U.E. no interior do prédio

Considerando a configuração da Figura 3.16, os parâmetros do sinal de LTE *uplink* (potência de transmissão variável) foram medidos no equipamento do *eNodeB*. Além disso, o gerador de TV foi ligado para que o nível de sinal dentro da van e junto ao U.E., localizado no corredor do prédio 6, pudesse ser medido. O ponto de medição (U.E.) está afastado do *eNodeB* instalado na van e recebendo pouco sinal de TV Digital. O nível de sinal do gerador de TV (sinal interferente) foi variado até atingir o piso de ruído.

No Teste 5, ocorreu uma situação intermediária de cobertura, neste caso o U.E. se encontra no corredor do prédio 6, também foi verificada uma redução na taxa de transmissão do *uplink*, de 29,5 Mbps para 20 Mbps e um *jitter* de 0,4 ms com EIRP da TV em 31 dBm. Não houve eventos com perda de pacote.

(f) Teste 6: Com TV Digital no canal 51 e *eNodeB* na rotatória

Os locais do *eNodeB* e do U.E. foram alterados, conforme a configuração da Figura 3.17, de modo que o *eNodeB* receba sinal fraco da TV e o U.E. receba sinal forte. O afastamento entre o transmissor de TV e o *eNodeB* seria uma das alternativas para a convivência entre os dois sistemas, baseando no controle de interferência entre o transmissor de TV Digital e o receptor do *eNodeB*, igualmente, entre o U.E. e os receptores de TV.

No Teste 6, quando o *eNodeB* foi deslocado para a rotatória, houve afastamento da transmissão de TV e o U.E. foi posicionado próximo à antena transmissora de TV Digital. Desta forma, verificou-se que o desempenho do sistema LTE se manteve com taxa de 30 Mbps e *jitter* de 0,3 ms com EIRP da TV em 31 dBm. Não houve eventos com perda de pacote.

A interferência da TV (canal digital adjacente) no sistema LTE não foi suficiente para afetar, significativamente, a disponibilidade de banda larga móvel aos usuários.

4

Validação do uso do simulador SEAMCAT

Para avaliar a probabilidade de interferência entre os sistemas, foram realizadas simulações através do *software* SEAMCAT [13], que utiliza a técnica de Monte Carlo. Esta técnica é uma excelente metodologia para lidar com a natureza estocástica de interferência dos dispositivos móveis LTE nos receptores de TV Digital [38].

O método de Monte Carlo é um algoritmo computacional, que se baseia na amostragem aleatória das variáveis envolvidas para obter resultados numéricos. Se os valores de entrada de um sistema forem definidos corretamente, gerando amostras suficientes, um sistema real pode ser simulado. Foram considerados, nas simulações, os parâmetros para os dois sistemas e, os cenários de teste avaliados na campanha de medições. O detalhamento completo dos resultados medidos e simulados de interferência do sistema LTE na TV Digital pode ser encontrado no Anexo C.

4.1.

O simulador de interferência (SEAMCAT)

O SEAMCAT é uma ferramenta estatística, baseada no método de Monte Carlo e desenvolvida pelo CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*), que avalia a interferência potencial entre diferentes sistemas de radiocomunicações em bandas co-canal ou em canais adjacentes [13].

O usuário pode definir os parâmetros dos canais de propagação dos enlaces interferente e desejado, assim como a distribuição estatística de diferentes parâmetros para os sistemas envolvidos como, por exemplo, a posição aleatória de receptores móveis. O SEAMCAT usa estas distribuições para gerar amostras aleatórias, chamadas de *snapshots*, com base no método de Monte Carlo. Para cada *snapshot*, a ferramenta calcula os níveis de sinais interferentes e desejado.

Assim, é possível calcular a probabilidade de interferência entre os sistemas através da relação dos sinais desejados e interferente no receptor- vítima para cada *snapshot*.

O usuário define os parâmetros dos sistemas, como constantes ou variáveis, ao executar o processo de Monte Carlo. A resposta do canal e a posição do móvel variarão aleatoriamente de acordo com as distribuições especificadas. Uma vez que os parâmetros relevantes são conhecidos, a simulação por Monte Carlo pode ser efetuada gerando amostras aleatórias. O resultado desejado é tomado como a média do número de observações. Para obter resultados confiáveis é necessário usar um grande número de amostras/eventos, em geral maior do que 20.000 amostras [13].

O SEAMCAT utiliza quatro elementos básicos: o transmissor (Tx TV) e o receptor do sinal desejado (Rx TV), o transmissor do sinal interferente (LTE *eNodeB*) e o receptor do sistema interferente (LTE U.E.). O receptor do sistema vítima (Rx TV) recebe o sinal desejado (dRSS - *desired Received Signal Strength*), enquanto que o transmissor-interferente (LTE *eNodeB* ou LTE U.E.) gera uma intensidade de sinal interferente (iRSS - *interfering Received Signal Strength*), conforme a Figura 4.1. Esta figura representa a interferência do sistema LTE no receptor de TV Digital, portanto, esta configuração pode ser mudada de acordo com o cenário avaliado. Os interferentes podem pertencer ao mesmo sistema que a vítima e são distribuídos de forma aleatória ao seu redor, como definido pelo usuário.

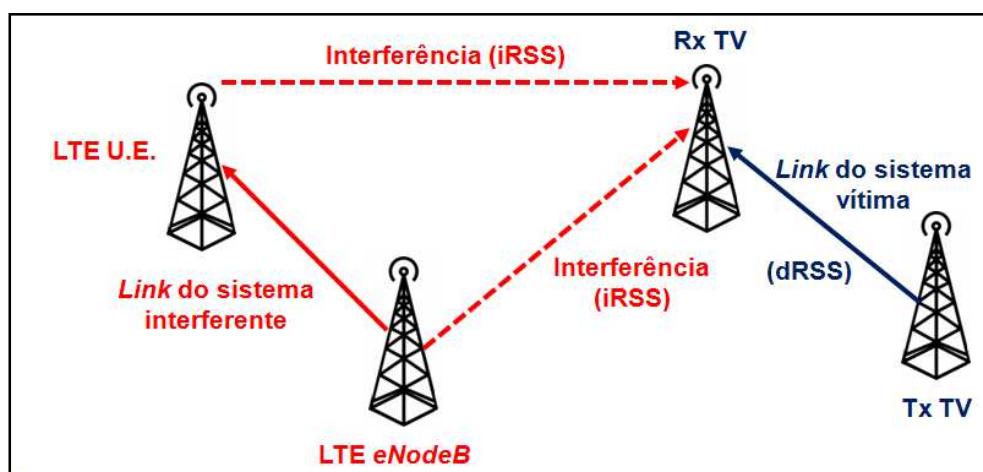


Figura 4.1: *Link do sistema interferente, link interferente e link do sistema vítima* [13]

A técnica de Monte Carlo considera vários instantes independentes no tempo e posições no espaço. Para cada instante ou evento simulado, um cenário é construído usando um número de variáveis aleatórias, como a posição do interferente com relação à vítima, a intensidade do sinal desejado, os canais que a vítima e o interferente estão usando, etc.. Desta forma, a ferramenta é capaz de avaliar a probabilidade de interferência entre os sistemas de rádio e determinar regras para o planejamento de frequências ou especificar limites para o desempenho do transmissor e receptor.

O cálculo da probabilidade de interferência é realizado por meio de dois mecanismos do SEAMCAT: EGE (*Event Generation Engine*) e ICE (*Interference Calculation Engine*). O EGE é o estágio inicial dos cálculos realizados pelo SEAMCAT, após a entrada dos parâmetros dos sistemas vítima e interferente. A etapa EGE gera valores aleatórios para os parâmetros com distribuições definidas pelo usuário, em seguida, processa esses valores para calcular o nível dos sinais dRSS e iRSS. Esse processo é repetido "N" vezes, onde "N" é o número de eventos (*snapshots*) determinado pelo usuário. Amostras geradas dos sinais desejado e interferente são armazenadas, separadamente, em matrizes de dados de comprimento "N". Para cada um dos principais mecanismos de interferência do SEAMCAT, como, interferência devido às emissões indesejadas (*unwanted*), bloqueio (*blocking*) pelo receptor-vítima e interferência devido aos produtos de intermodulação gerados entre dois interferentes; matrizes de dados são geradas separadamente. A etapa ICE gera novas amostras, a partir das informações obtidas pelo EGE, e avalia cada uma das amostras, se o receptor-vítima sofre interferência ou não. Essa é a parte final da arquitetura do SEAMCAT. As amostras dos sinais dRSS e iRSS, geradas pelo EGE, são comparadas com os critérios sinal-ruído (C/N , $C/N+I$, etc.) especificados no cenário para calcular a probabilidade real de interferência, com a condição de que o nível de sinal dRSS seja maior do que a sensibilidade do receptor-vítima [13].

4.2.

Análise da interferência usando o SEAMCAT

O SEAMCAT considera quatro critérios de interferência: C/I , $C/(I+N)$, $(N+I)/N$ e I/N . A interferência ocorre quando a razão de sinal/interferência (C/I)

do receptor do sistema vítima é menor do que o valor mínimo permitido. Conhecendo a intensidade do sinal desejado (dRSS) e do sinal interferente (iRSS) é possível calcular a razão C/I, como mostra a Figura 4.2 [13].

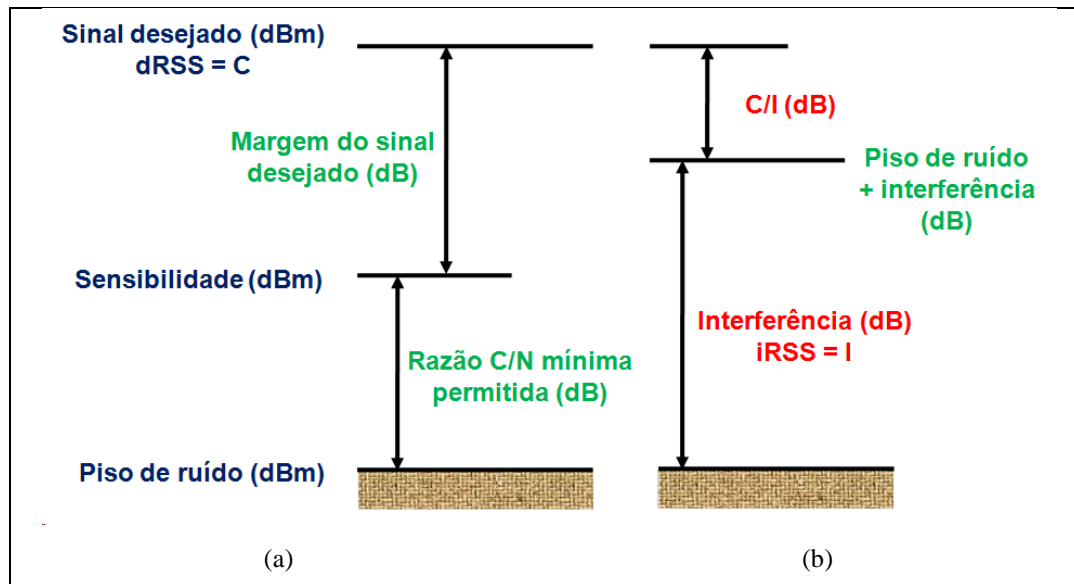


Figura 4.2: Níveis de sinais desejado e interferente

A Figura 4.2 (a) representa a situação quando não há interferência e a vítima está recebendo o sinal desejado com certa margem. Neste caso, o nível de sinal que chega à vítima é dado pela soma da sensibilidade com a margem de sinal desejado. A Figura 4.2 (b) ilustra o princípio para o cálculo da probabilidade de interferência no receptor-vítima. Ao introduzir a interferência, ela se adiciona ao piso de ruído. A diferença entre a intensidade do sinal desejado (dRSS) e o sinal interferente (iRSS) determina a razão sinal-interferência (C/I), expressa em dB. Esta razão deve ser maior do que o limiar C/I necessário para que a interferência seja suportada. A simulação por Monte Carlo verifica esta condição e indica a presença ou não de interferência acima dos limites máximos aceitáveis. Para cada evento aleatório onde dRSS é maior do que a sensibilidade do receptor-vítima, o SEAMCAT calcula a probabilidade de interferência com base em duas condições: (1) se a razão C/I calculada é maior do que o critério C/I estabelecido: "bom evento" e (2) se a razão C/I calculada é menor do que o critério C/I estabelecido: "evento com interferência". Finalmente, depois do ciclo de "N" eventos (N_{total}), a probabilidade de interferência total (IP) é dada por [13]:

$$IP = 1 - (N_{\text{"bons eventos"}/N_{\text{total}}). \quad (4.1)$$

O SEAMCAT considera diferentes fontes de interferência, tais como emissões indesejadas, bloqueio do receptor, produtos de intermodulação e efeitos de interferência co-canal e canal adjacente [13].

O nível de emissões indesejadas, vindo de canais adjacentes, que é capturado pelo receptor-vítima, é determinado pelo uso de máscaras de transmissão do interferente (Figura 4.3), seletividade do receptor-vítima, separação de frequências entre interferente e vítima, ganho das antenas e perda de propagação. A potência indesejada é calculada através da eq. (4.2):

$$iRSS_{\text{indesejado}} = P + G_{TX} + G_{RX} - L, \quad (4.2)$$

onde P é a potência do interferente na banda do receptor-vítima (dBm/kHz), G_{TX} e G_{RX} são os ganhos das antenas transmissora e receptora do interferente e L é a perda de propagação.

As emissões indesejadas consistem de emissões espúrias e emissões fora de faixa do transmissor-interferente. Estas emissões serão apresentadas brevemente.

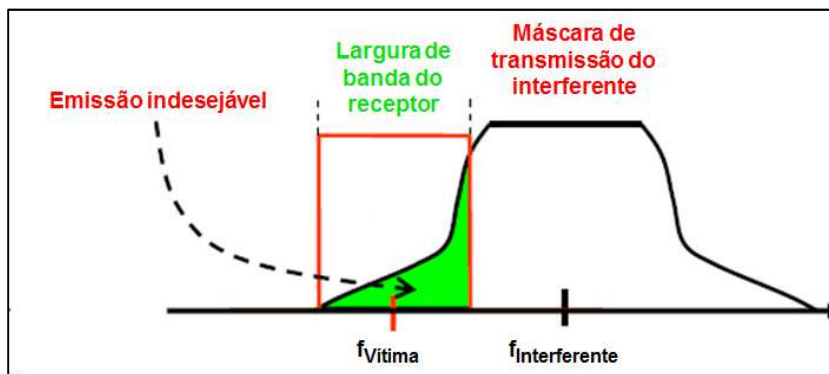


Figura 4.3: Interferência devido às emissões indesejadas do transmissor-interferente capturada pelo receptor-vítima [13]

A potência de bloqueio do receptor é a potência que chega no receptor-vítima devido às suas imperfeições de seletividade. Esta potência parte dos transmissores interferentes, como mostra a Figura 4.4. A potência de bloqueio é determinada através da potência de transmissão do interferente (P_{TX}), do ganho das antenas transmissora e receptora do interferente (G_{TX} e G_{RX}), da perda de propagação (L), da máscara de proteção do receptor-vítima (Att) e da separação

de frequências entre interferente e vítima, conforme eq. (4.3). O cálculo da potência de bloqueio é determinado na frequência do interferente, não levando em consideração a sua largura de banda [13].

$$iRSS_{\text{bloqueio}}(f_{\text{interferente}}) = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L - Att(f_{\text{interferente}}). \quad (4.3)$$

O termo “bloqueio” do receptor é usado no SEAMCAT para descrever a função de seletividade do receptor-vítima, como uma medida da capacidade do receptor em filtrar o sinal indesejado no canal adjacente, de modo que este sinal não afete a transmissão da informação em questão. A seta em vermelho na Figura 4.4 representa o bloqueio do receptor, dado em dB, que é a atenuação aplicada no sinal interferente presente na entrada do receptor-vítima [13]. O bloqueio pode ser um valor constante definido pelo usuário, uma máscara de filtro ou valores da razão de proteção que é o valor mínimo da relação sinal-interferência na entrada do receptor em função da separação de frequências entre os sinais desejado e interferente.

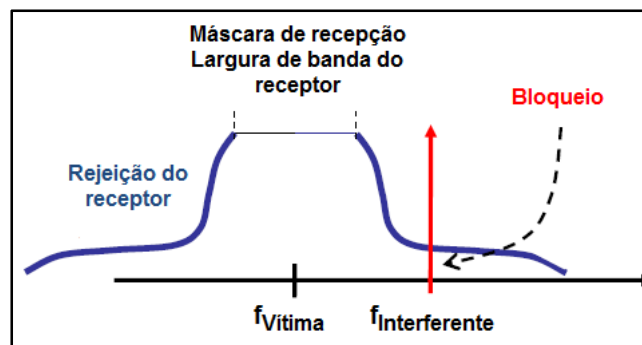


Figura 4.4: Bloqueio do receptor-vítima [13]

A combinação dos dois mecanismos citados, emissões indesejadas e bloqueio do receptor, pode ser estudada, simultaneamente, no SEAMCAT [13], como indica a Figura 4.5.

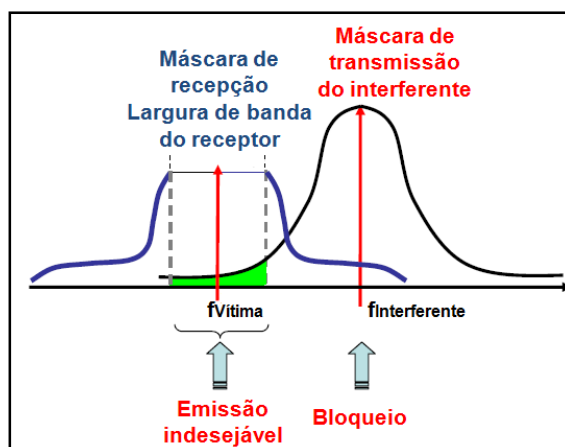


Figura 4.5: Combinação dos dois mecanismos, emissões indesejadas e bloqueio do receptor, no SEAMCAT [13]

Para um interferente que transmite em uma frequência que esteja fora da sua banda de transmissão (OOB), o nível de interferência é uma função do (a) “vazamento” espectral do interferente, definido por sua densidade espectral de potência emitida, e (b) da resposta em frequência do filtro do receptor. Estes dois efeitos podem ser caracterizados pela razão entre o “vazamento” de canal adjacente do interferente (ACLR) e a seletividade do canal adjacente do receptor-vítima (ACS - *Adjacent Channel Selectivity*), respectivamente, conforme a Figura 4.6. A combinação entre estes dois parâmetros pode ser descrita pela seguinte forma matemática [13]:

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}}. \quad (4.4)$$

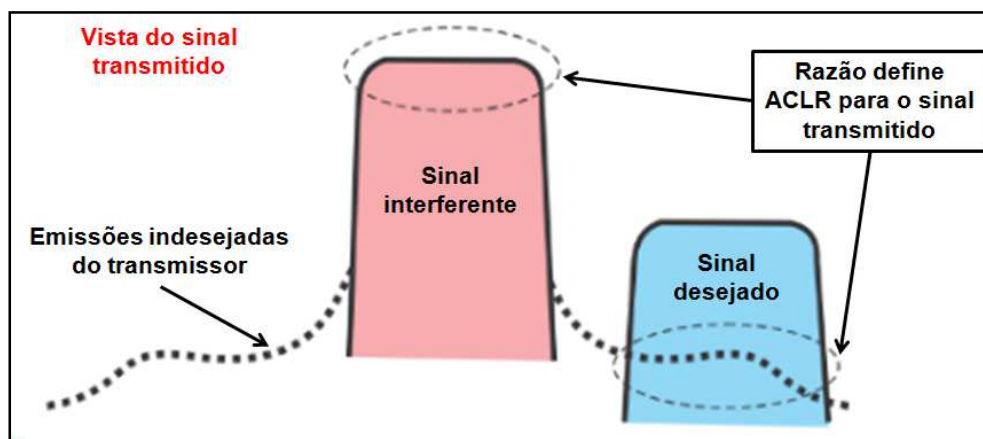
As emissões fora de faixa (OOB) do sistema transmissor-interferente resultam das limitações do seu próprio equipamento de transmissão. Qualquer sistema de transmissão é projetado para operar em uma banda de frequência específica, mas a transmissão não se limita perfeitamente a esta banda, porque os filtros do sistema não são capazes de cessar totalmente as emissões nos canais adjacentes, apenas atenuam as interferências. Um receptor de TV Digital configurado para receber um dado canal, também receberá algum conteúdo atenuado vindo de canais adjacentes [38].

O termo ACLR (*Adjacent Channel Leakage Ratio*) é utilizado para quantificar as emissões indesejadas [13]. O ACLR de um sinal é definido como a razão entre a potência do sinal em determinado canal (nominalmente igual à

potência ao longo da banda passante do sinal) e a potência do sinal quando medida na saída do filtro do receptor (nominalmente retangular) centrado numa frequência de canal adjacente [13]. Este parâmetro representa a capacidade do filtro do interferente suprimir sinais indesejados nos canais adjacentes, conforme Figura 4.6 (a).

O ACS de um receptor é definido como a razão entre a atenuação do filtro do receptor na frequência do canal desejado e a atenuação do filtro do receptor na frequência do canal adjacente. Este parâmetro representa a habilidade do filtro do receptor-vítima suprimir os sinais interferentes no canal adjacente [3], representados na Figura 4.6 (b).

O ACIR (*Adjacent Channel Interference Ratio*) é definido como a razão da potência total transmitida de uma fonte (BS ou U.E.) e da potência total do interferente recebida pelo receptor-vítima no canal adjacente, como resultado de imperfeições do transmissor-interferente (ACLR) e do receptor-vítima (ACS). Em outras palavras, para uma potência de interferência recebida na frequência *offset* (Δf) do sinal desejado, e para um dado valor de ACIR (função da frequência *offset*), a potência de interferência experimentada no receptor é reduzida pelo ACS [13].



(a)

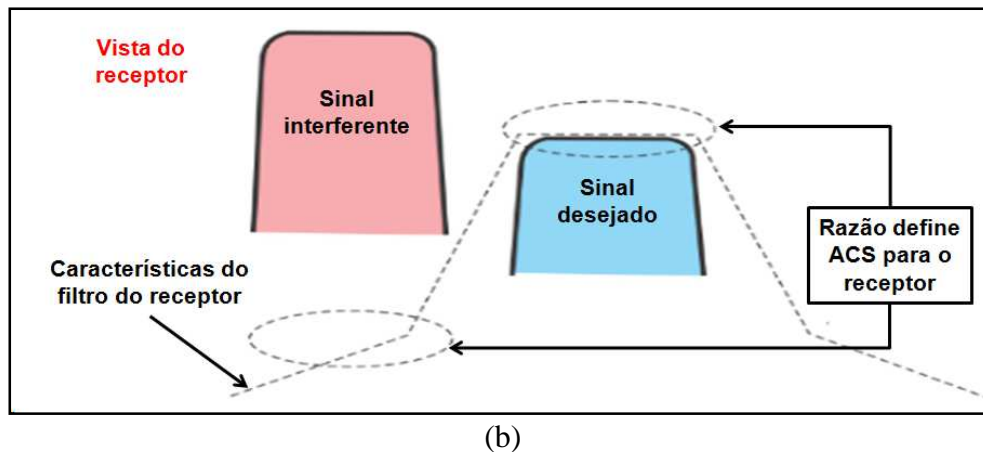


Figura 4.6: Interferência com ACLR e ACS limitados [13]

A mitigação de interferências OOB é uma tarefa conjunta para o ACLR do sistema transmissor-interferente e do ACS do sistema receptor-vítima. Assim, para a mitigação de interferências prejudiciais entre o sistema de TV Digital, operando nos canais de 14 a 51, e o sistema LTE, operando na faixa de 698 MHz a 806 MHz, podem ser utilizadas uma ou mais das seguintes técnicas, dependendo do local e características de instalação das estações transmissora e receptora [3]:

(a) Separação mínima de afastamento entre os transmissores de um sistema e os receptores de outro, de modo que as relações de proteção entre eles sejam atendidas e os sistemas possam coexistir sem que haja interferência prejudicial mútua;

(b) Utilização de filtros, empregados tanto nos sistemas de transmissão interferente, com o objetivo de melhorar o ACLR, isto é, escolher máscaras mais limitadas, quanto nos receptores-vítima, a fim de melhorar o ACS, da mesma maneira que o limiar de saturação;

(c) Determinação das potências de transmissão adequadas tanto do sistema vítima quanto do sistema interferente, dependendo da localização, direções ou canais específicos, de modo a garantir a relação de proteção;

(d) Estabelecimento das características e condições das antenas de transmissão e recepção.

4.3.

Resultados da simulação da interferência do LTE na TV Digital

Os dados de entrada utilizados nas simulações podem ser encontrados no Anexo C. As especificações técnicas do sistema de transmissão e recepção de TV

Digital foram baseadas nas normas ABNT 15601 [39] e 15604 [40], respectivamente. Já as especificações técnicas do sistema de transmissão e recepção do LTE foram baseadas nas especificações 3GPP 36.104 [27] e 36.101 [26], respectivamente. Os pontos de localização e características das antenas foram os mais próximos dos usados durante a campanha de medições.

O SEAMCAT permite o uso de máscaras de emissão de diversos sistemas, bem como a avaliação de limites de emissões indesejadas, máscaras de bloqueio e intermodulação. Vale ressaltar, que para cada simulação associada a um cenário de medição, uma nova máscara de emissão foi calculada com base em recomendações internacionais. A metodologia de cálculo é detalhada a seguir.

4.3.1.

Metodologia para o cálculo das máscaras de transmissão

A máscara de emissão (SEM - *Spectrum Emission Mask*) é uma medida relativa das emissões fora de faixa (OOB) em relação à potência *in-band* que, por sua vez, é medida sobre o sinal de entrada RF que passa por um filtro RRC (*Root-Raised Cosine*). Frequentemente, este filtro é usado na transmissão e recepção de sistemas de comunicação digital. A medição SEM é usada para avaliar as emissões excedentes que possam interferir em outros canais ou outros sistemas. A emissão OOB ocorre nas frequências imediatamente fora da chamada banda oportuna, sendo resultante do processo de modulação e da não-linearidade no transmissor, mas exclui as emissões espúrias. A banda oportuna é a largura de banda de frequências suficiente para assegurar a transmissão de informações com qualidade e taxa necessárias sob condições específicas. As emissões espúrias ocorrem nas frequências que estão fora da banda oportuna e seu nível não deve afetar a transmissão de informações correspondentes. Estas emissões incluem emissões harmônicas, parasitas, produtos de intermodulação e produtos de conversão de frequência, mas excluem as emissões OOB [41].

Qualquer emissão indesejada com menos de 250% da largura de banda oportuna para emissão e que caia em frequências separadas da frequência central do transmissor será, geralmente, considerada como emissão fora de faixa. As emissões com um valor igual ou maior do que 250% da largura de banda necessária são consideradas espúrias [42].

Para o cálculo de máscaras de emissão da BS (*eNodeB*) do LTE foi usada a metodologia da recomendação da ITU-R SM.328-11 [43] e do relatório de especificações técnicas 3GPP TS 36.104 [27].

Para obter a máscara da Figura 4.7, foram utilizados, em conjunto, a tabela da Figura 4.8, que apresenta o cálculo para a obtenção das emissões OOB, e o limite de emissão espúria referente à faixa de 700 MHz, conforme a Figura 4.9.

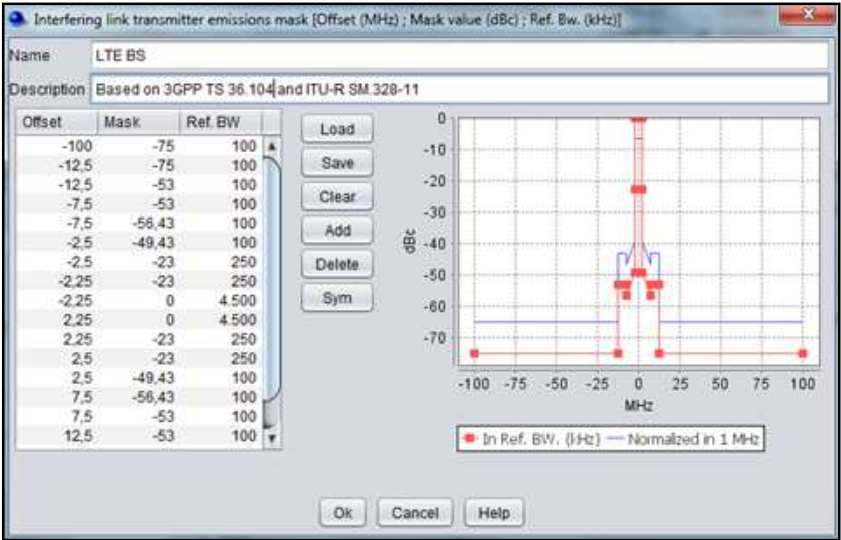


Figura 4.7: Exemplo de máscara de transmissão para *eNodeB* (LTE 5 MHz) no SEAMCAT com potência de transmissão de 39 dBm

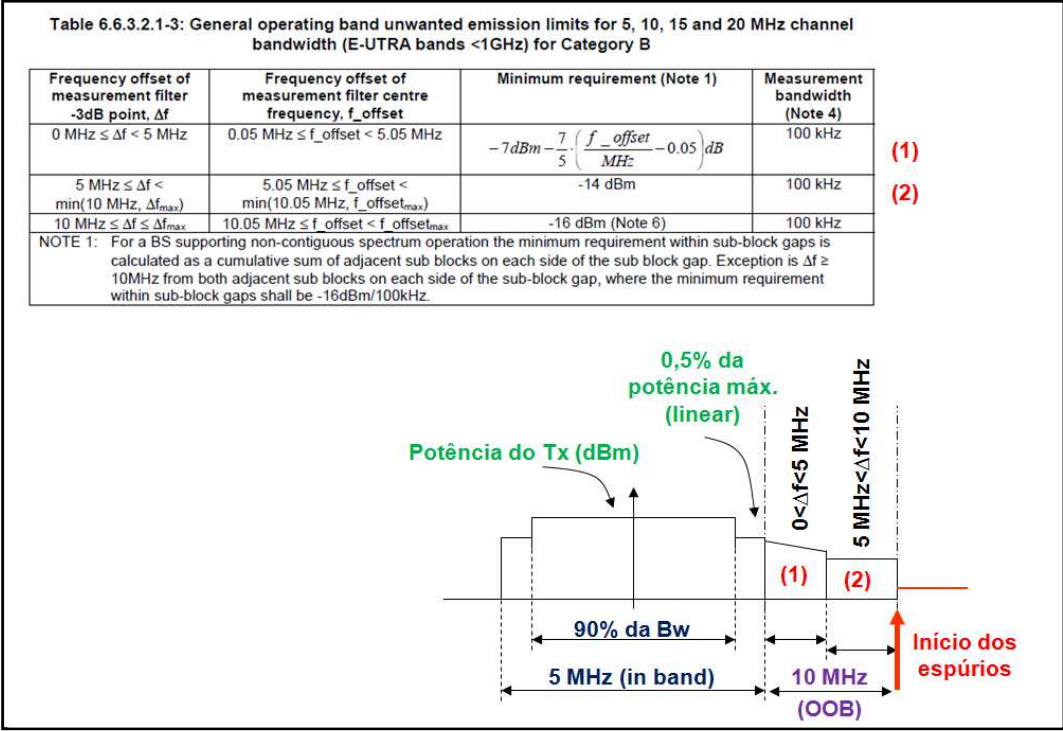


Figura 4.8: Máscara de transmissão para *eNodeB* [43] associada com a metodologia de cálculo do 3GPP TS 36.104 [27]

6.6.4.1.2 Spurious emissions (Category B)

6.6.4.1.2.1 Minimum Requirement

The power of any spurious emission shall not exceed the limits in Table 6.6.4.1.2.1-1

Table 6.6.4.1.2.1-1: BS Spurious emissions limits, Category B

Frequency range	Maximum Level	Measurement Bandwidth	Note
9 kHz ↔ 150 kHz	-36 dBm	1 kHz	Note 1
150 kHz ↔ 30 MHz	-36 dBm	10 kHz	Note 1
30 MHz ↔ 1 GHz	-36 dBm	100 kHz	Note 1
1 GHz ↔ 12.75 GHz	-30 dBm	1 MHz	Note 2
12.75 GHz ↔ 5 th harmonic of the upper frequency edge of the DL operating band in GHz	-30 dBm	1 MHz	Note 2, Note 3

NOTE 1: Bandwidth as in ITU-R SM.329 [2] , s4.1

NOTE 2: Bandwidth as in ITU-R SM.329 [2] , s4.1. Upper frequency as in ITU-R SM.329 [2] , s2.5 table 1

NOTE 3: Applies only for Bands 22, 42 and 43.

Figura 4.9: Tabela de emissões espúrias do 3GPP TS 36.104 [27]

Para o cálculo de máscaras de emissão do LTE U.E., foi usada a metodologia do relatório de especificações técnicas 3GPP TS 36.101 [26]. O espectro do transmissor U.E. consiste de três componentes: emissão dentro da largura de banda ocupada (largura de banda do canal), OOB e emissões espúrias, de acordo com a Figura 4.10 [26].

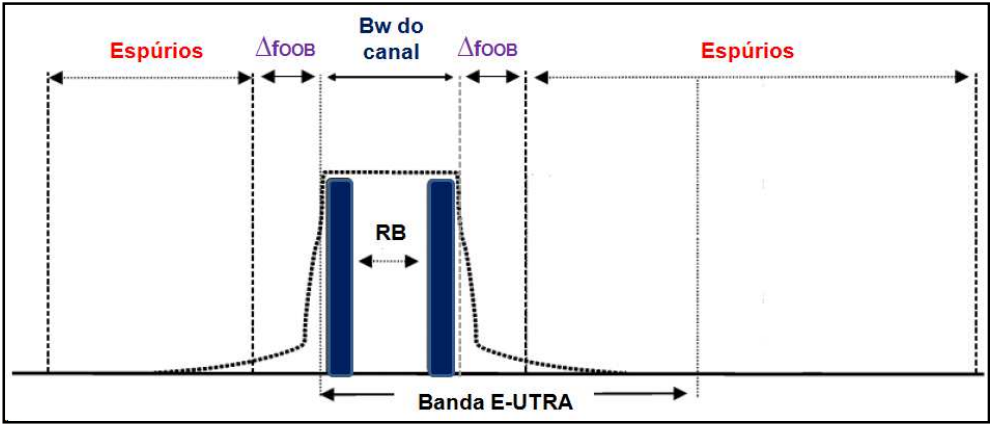


Figura 4.10: Espectro de transmissão do U.E. [26]

O limite de emissão OOB é determinado em termos de uma máscara de emissão para U.E.. Esta máscara se aplica às frequências Δf_{OOB} a partir da borda da banda E-UTRA (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access*). Para frequências muito maiores do que Δf_{OOB} , é utilizado o valor de -36 dBm para a faixa de 700 MHz, como na Figura 4.9. Assim, a potência de qualquer transmissor

U.E. não deve exceder os níveis especificados na Figura 4.11. Neste caso, foi considerada a largura de banda de 5 MHz [26].

Table 6.6.2.1.1-1: General E-UTRA spectrum emission mask									
Δf_{00B} (MHz)	Spectrum emission limit (dBm)/ Channel bandwidth								Measurement bandwidth
	1.4 MHz	1.6 MHz	3.0 MHz	3.2 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	
± 0-1	[TBD]	[TBD]	[TBD]	[TBD]	-15	-18	-20	-21	30 kHz
± 1-2.5	[-10]	[-10]	[-10]	[TBD]	-10	-10	-10	-10	1 MHz
± 2.5-5	[-25]	[-25]	[-10]	[-10]	-10	-10	-10	-10	1 MHz
± 5-6			[-25]	[-25]	-13	-13	-13	-13	1 MHz
± 6-10					-25	-13	-13	-13	1 MHz
± 10-15						-25	-13	-13	1 MHz
± 15-20							-25	-13	1 MHz
± 20-25								-25	1 MHz

Figura 4.11: Tabela de emissões do 3GPP TS 36.101 [26]

O SEAMCAT [13] calcula a potência absoluta indesejada considerando a largura de banda do receptor-vítima e a largura de banda de referência. Esta potência também pode ser calculada através da integração das emissões indesejadas na banda do receptor-vítima. Os limites são dados como potência absoluta (dBm), definidos na tabela da Figura 4.11, e os valores da máscara são dados pela diferença entre essa potência limite e a potência total de transmissão, por exemplo, $-15\text{ dBm} - 23\text{ dBm} = -38\text{ dBm}$, conforme a Figura 4.12.

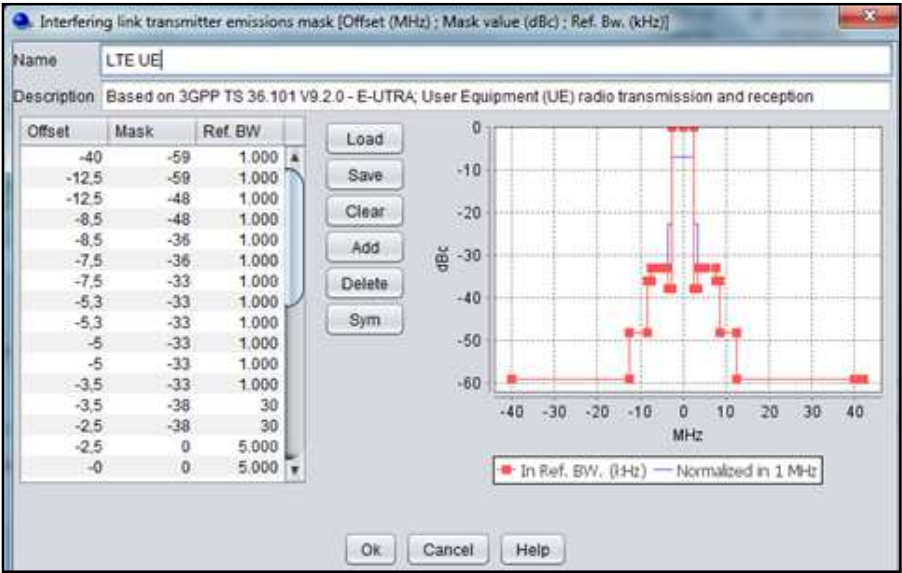


Figura 4.12: Exemplo de máscara de transmissão para U.E. (LTE 5 MHz) no SEAMCAT com potência de transmissão de 23 dBm

4.3.2. Comparação entre os resultados medidos e simulados

(a) Teste 1: Sem *eNodeB* operando

A Figura 4.13 mostra o cenário do Teste 1 no simulador SEAMCAT [13]. O programa retorna os níveis médios do sinal desejado (TV Digital) e interferente (LTE). O primeiro gráfico à direita apresenta a variação do sinal desejado em relação ao número de eventos simulados. Este efeito ocorre devido às variações inseridas no modelo de propagação. Os dois últimos gráficos mostram o nível de sinal interferente calculado pelo simulador. Os parâmetros utilizados para esta simulação podem ser encontrados no Anexo C(a).

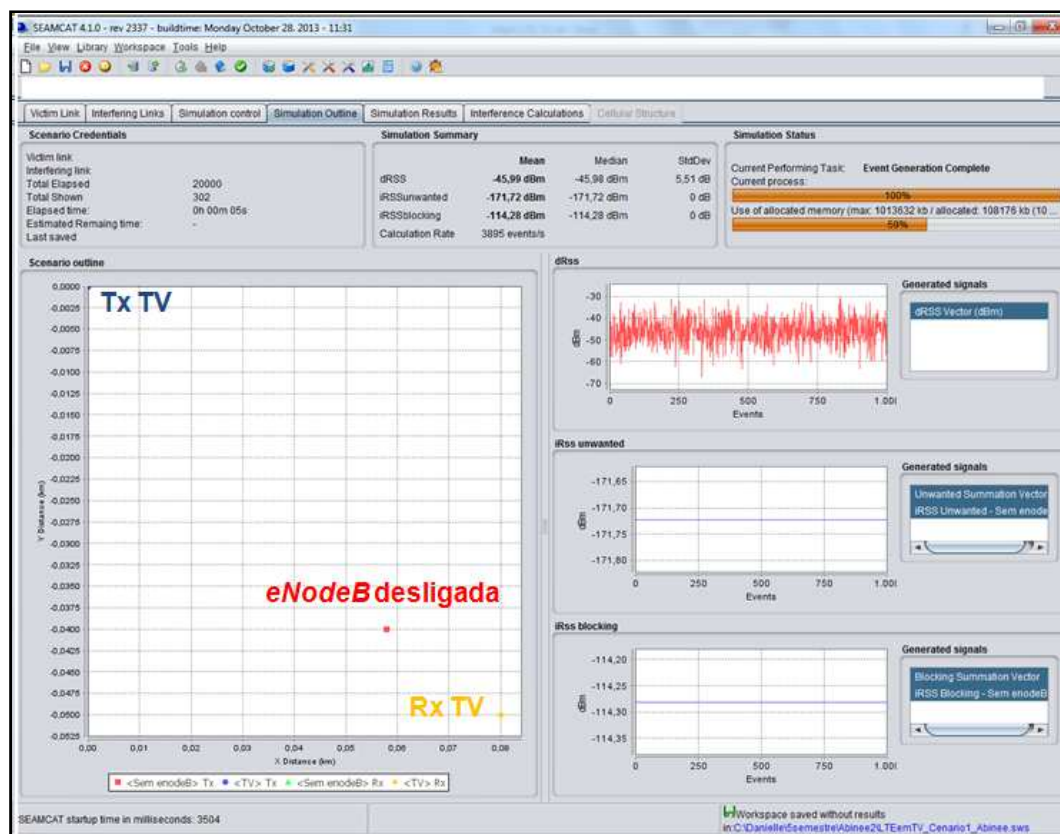


Figura 4.13: Simulação do Teste 1 no SEAMCAT: apenas sistema de TV Digital canal 51 (modo *full-seg*) presente.

A Figura 4.14 apresenta a máscara de emissão do interferente (*eNodeB*). Apesar do *eNodeB* estar desligado no teste real, na simulação é necessário inserir a máscara de emissão do interferente. Foi utilizada uma potência de transmissão reduzida de -50 dBm. O objetivo deste teste foi verificar o nível de sinal da TV

Digital que chega ao receptor sem nenhum sistema interferente, apenas considerando espaço livre.

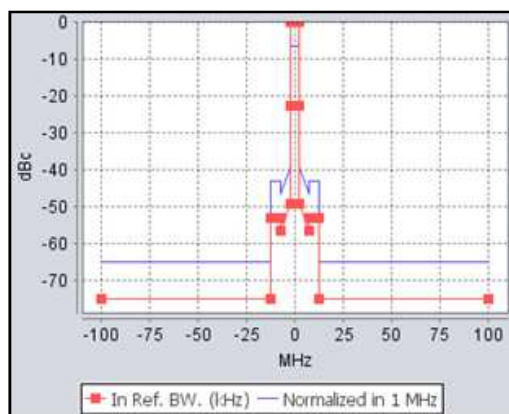
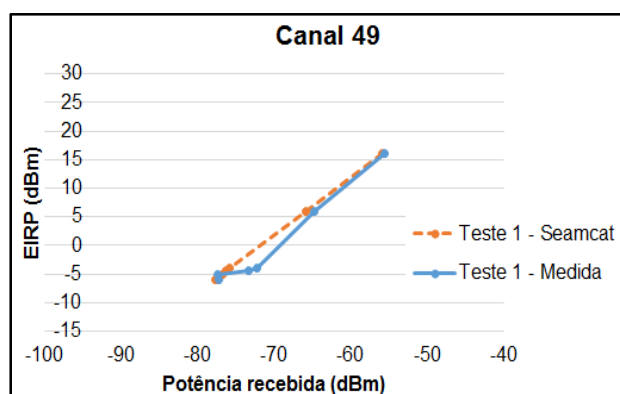
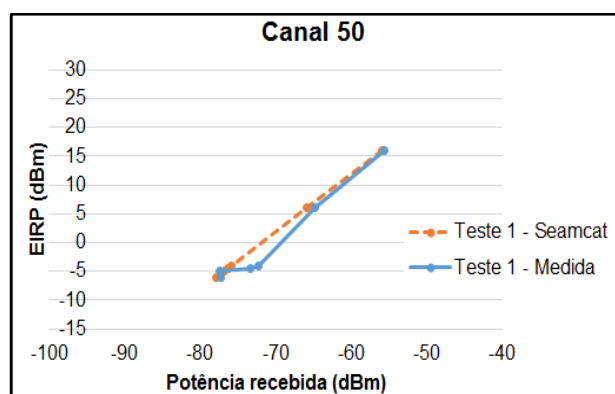


Figura 4.14: Máscara de emissão do *eNodeB* usada no Teste 1

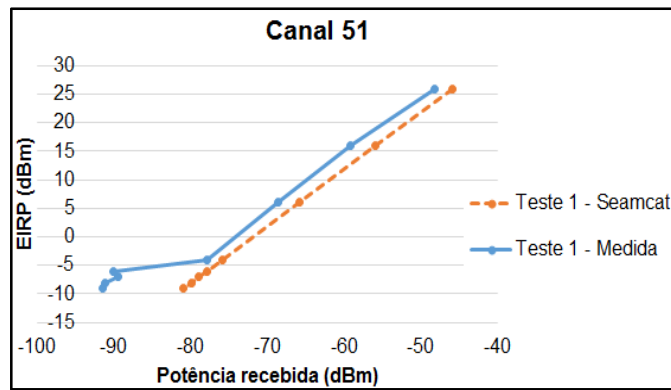
Os resultados da comparação dos dados simulados com os medidos no Teste 1, para os canais 49, 50 e 51, são apresentados na Figura 4.15. Pode ser observado um aumento da potência recebida no receptor de TV quando a EIRP do sistema de transmissão aumenta. Outro ponto a ser observado é que próximo ao limiar de recepção, a curva da medida não acompanha a simulação, o que é consequência da não-linearidade do receptor de TV Digital. Os receptores têm um fator de correção de erros para manter o seu perfeito funcionamento, no momento em que o nível de sinal recebido atinge o seu limiar de recepção. As pequenas diferenças no comportamento dos resultados medidos dos canais 49 e 50 com a medida do canal 51 podem ter sido causadas por vários fatores, como, medidas realizadas em dias diferentes, ajuste dos equipamentos de forma diferente e uso de receptores e antenas diferentes.



(a)



(b)



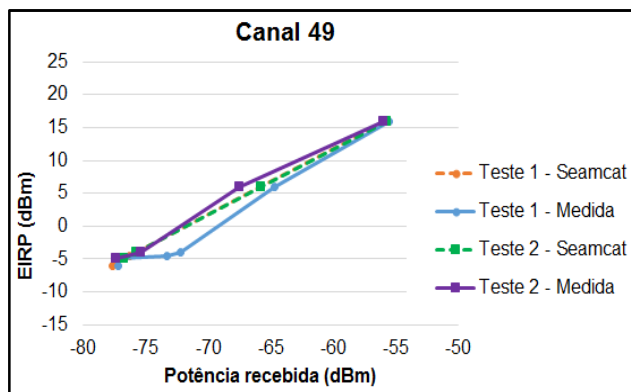
(c)

Figura 4.15: Resultados comparativos entre simulação e medida do Teste 1 para os canais (a) 49, (b) 50 e (c) 51

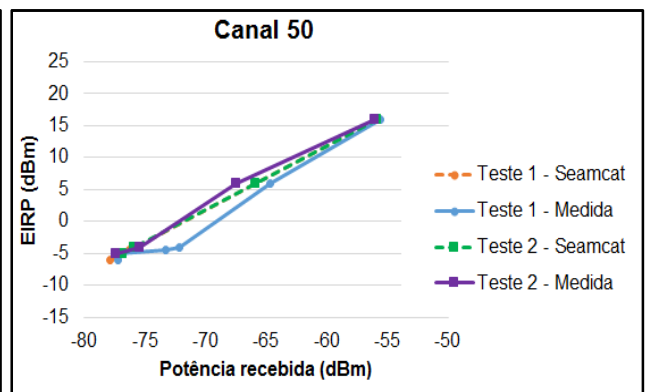
(b) Teste 2: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando com potência de transmissão em 39 dBm sem U.E. operando (*downlink* em modo *idle*)

No Teste 2, o *eNodeB* (sentido de *downlink*) foi ligado com uma potência de 39 dBm ou 8 W, e todas as configurações dos *links* vítima e interferente são mantidas, em relação ao Teste 1, indicadas no Anexo C (b).

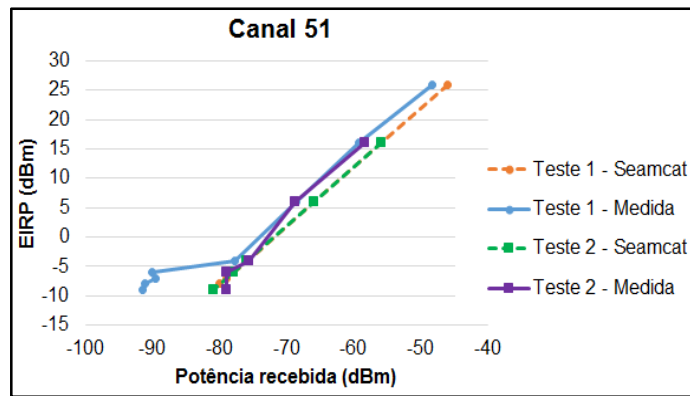
Uma comparação entre os resultados medidos e simulados do Teste 1 e os resultados do Teste 2, com o *eNodeB* ligado, pode ser observada na Figura 4.16, para os canais 49, 50 e 51. O *eNodeB* ligado corresponde ao sistema interferente sobre o sistema de recepção da TV Digital. No SEAMCAT, o sistema OFDMA DL (*downlink*) para o *link* interferente foi selecionado, de modo que a simulação se torne mais próxima da situação real. A máscara de emissão do equipamento *eNodeB* está representada pela Figura 4.14. Avaliando os resultados, é possível concluir que o sistema de transmissão do LTE BS não gerou perturbações significativas no sistema de TV. A concordância entre os resultados medidos e simulados é muito boa.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16: Resultados comparativos entre Teste 1 e Teste 2 para os canais (a) 49, (b) 50 e (c) 51

(c) Teste 3: Interferência em TV Digital com U.E. operando no interior da van

No Teste 3 o *eNodeB* (sentido de *downlink*) e a U.E. (sentido de *uplink*) estão operando com potência de 39 dBm e 23 dBm, respectivamente. Lembra-se que o objetivo deste teste foi medir a interferência de LTE *downlink* no receptor de TV. Todas as outras configurações dos *links* vítima e interferente são mantidas, em relação ao Teste 1, indicadas no Anexo C (c).

O *eNodeB* e o U.E., em operação, representam o sistema interferente sobre o sistema de recepção da TV Digital. No SEAMCAT, os sistemas OFDMA DL (*downlink*) e UL (*uplink*) para o *link* interferente do *eNodeB* e U.E., respectivamente, foram selecionados. A máscara de emissão do equipamento U.E. está representada pela Figura 4.12. A Figura 4.17 apresenta uma comparação entre os resultados medidos e simulados. Nesta figura, vale destacar que, no ponto do limiar de recepção no modo *full-seg*, os resultados divergem entre si devido à não linearidade dos equipamentos.

Os resultados dos Testes 1, 2 e 3 foram comparados e apresentados na Figura 4.18 [44] [45]. Avaliando o resultado da Figura 4.18, é possível concluir que não houve diferença significativa entre os Testes 1, 2 e 3. Uma justificativa para este resultado é a blindagem provocada pela van, prevalecendo, assim, o sinal desejado no receptor de TV Digital. Observando a Tabela A.9, do Anexo A o limiar de recepção foi de -56,5 dBm. Como, neste caso, foi utilizado um LNA (*Low Noise Amplifier*) de 20 dB na medição, o valor real correspondente do limiar foi igual a -76,5 dBm. No simulador, este valor foi de -80,87 dBm, ou seja, ele se tornou melhor do que no cenário de medição [44] [45].

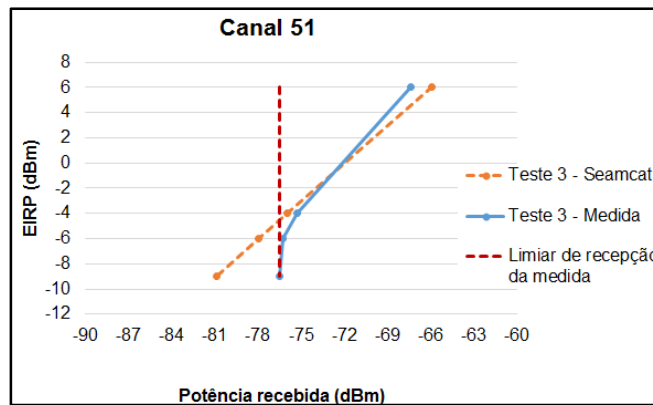


Figura 4.17: Resultado comparativo entre simulação e medida do Teste 3 para canal 51

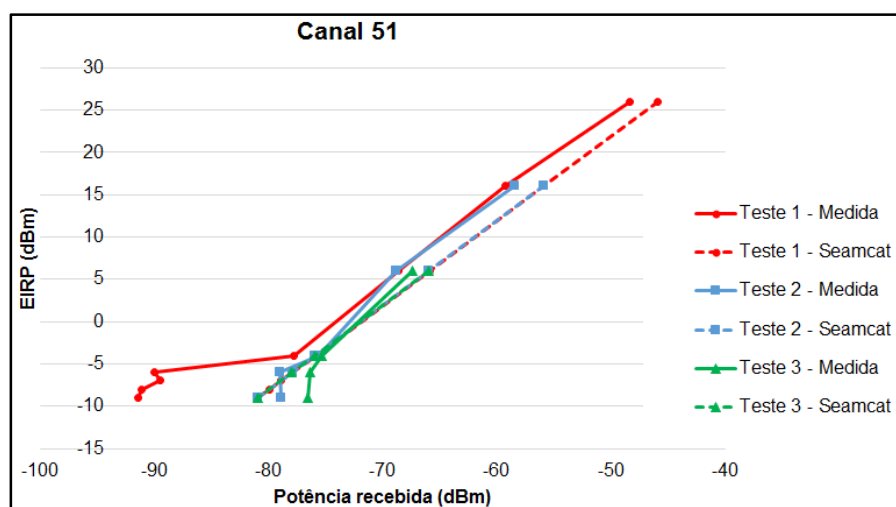


Figura 4.18: Resultados comparativos entre Testes 1, 2 e 3

Da Tabela 4.1 à Tabela 4.3 estão apresentados o valor do nível de sinal desejado (dRSS) na vítima e de sinal interferente (iRSS) calculados pelo simulador, em três testes diferentes. Repetindo, o dRSS é a intensidade do sinal desejado recebido na vítima (receptor de TV Digital), proveniente do transmissor do sistema vítima; o iRSS é a intensidade do sinal do transmissor-interferente que chega no receptor-vítima. A interferência indesejada é a emissão do interferente que cai na banda do receptor-vítima e a interferência de bloqueio é a potência de emissão total do interferente reduzida pela função atenuação de bloqueio (seletividade) do receptor-vítima [13]. De acordo com tais tabelas, quando se introduz e aumenta o número de transmissores-interferentes (Teste 1 ao Teste 3), o nível de sinal indesejado no receptor-vítima aumenta. Consequentemente, o nível de sinal interferente que cai próximo à banda do receptor-vítima também

aumenta, prejudicando a sua capacidade de atenuar sinais interferentes. Já o nível de sinal desejado no receptor de TV permanece semelhante para os três testes.

Tabela 4.1: Teste 1: valores desejado (dRSS) e interferente (iRSS) calculados pelo SEAMCAT

Apenas sistema de TV Digital em operação – Canal 51			
EIRP (dBm)	dRSS (dBm)	iRSS indesejado (dBm)	iRSS bloqueio (dBm)
16	-55,87	-171,12	-113,68
6	-65,87	-171,12	-113,68
-4	-75,86	-171,12	-113,68
-6	-77,89	-171,12	-113,68
-9	-80,99	-171,12	-113,68

Tabela 4.2: Teste 2: valores desejado (dRSS) e interferente (iRSS) calculados pelo SEAMCAT

Sistema de TV Digital e <i>eNodeB</i> em operação – Canal 51			
EIRP (dBm)	dRSS (dBm)	iRSS indesejado (dBm)	iRSS bloqueio (dBm)
16	-55,92	-82,12	-24,68
6	-65,9	-82,12	-24,68
-4	-75,92	-82,12	-24,68
-6	-77,9	-82,12	-24,68
-9	-80,94	-82,12	-24,68

Tabela 4.3: Teste 3: valores desejado (dRSS) e interferente (iRSS) calculados pelo SEAMCAT

Sistema de TV Digital, <i>eNodeB</i> e U.E. na van em operação – Canal 51			
EIRP (dBm)	dRSS (dBm)	iRSS indesejado (dBm)	iRSS bloqueio (dBm)
16	-55,94	-80,96	-24,66
6	-65,94	-80,97	-24,66
-4	-75,94	-80,96	-24,66
-6	-77,93	-80,95	-24,66
-9	-80,87	-80,98	-24,66

(d) Teste 4: Interferência em TV Digital com U.E. operando ao lado da antena log-periódica receptora do sinal de TV

No Teste 4, o U.E. foi posicionado ao lado da antena receptora de TV Digital, modelo log-periódica, a uma distância de 1,5 m. O *eNodeB* (sentido de *downlink*) e U.E. (sentido de *uplink*) estão operando com potência de 39 dBm e 23 dBm, respectivamente. Todas as outras configurações dos *links* vítima e interferente são mantidas, em relação ao Teste 3, indicadas no Anexo C (d). A Figura 4.19 mostra o cenário do Teste 4 no simulador SEAMCAT.

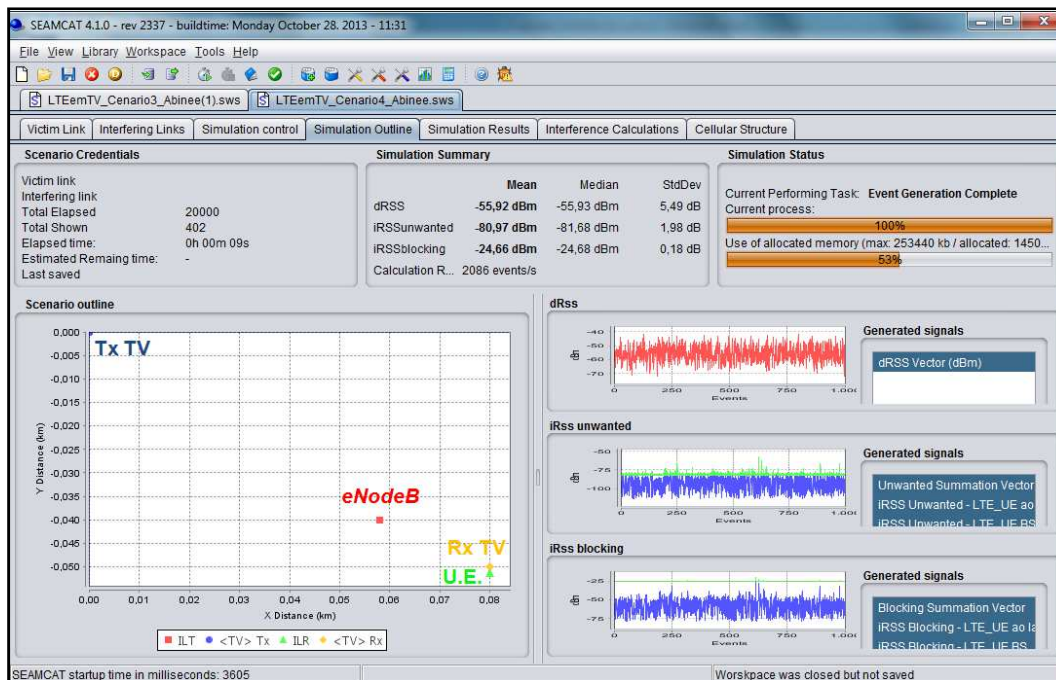


Figura 4.19: Simulação do Teste 4 no SEAMCAT: sistema de TV Digital canal 51 (modo *full-seg*) e sistema LTE (*downlink* e *uplink*) presentes.

A Figura 4.20 apresenta uma comparação entre os resultados medidos e simulados. Nesta figura, vale observar que próximo ao limiar de recepção, a curva medida perde a linearidade. Na região linear há uma diferença de cerca de 9 dB entre os resultados simulados e os medidos. Uma possível razão para tal comportamento é o uso, nas simulações, de máscaras padrão baseadas em normas internacionais, que podem diferir das máscaras reais dos equipamentos envolvidos. As máscaras apresentadas nas normas correspondem ao pior caso admissível e são, muitas vezes, inferiores às dos equipamentos reais. Além disso, há que considerar as limitações das medições.

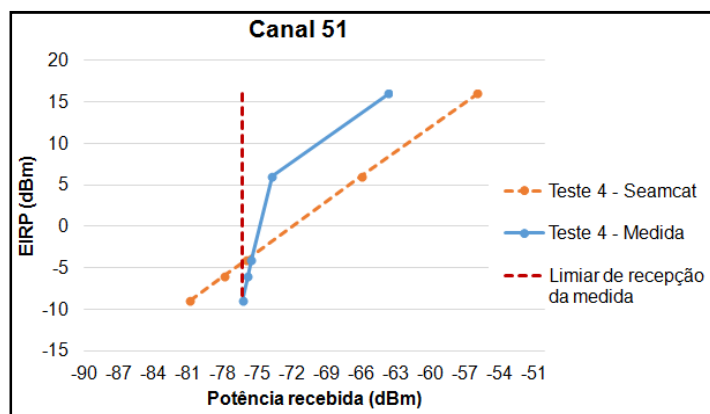


Figura 4.20: Resultado comparativo entre simulação e medida do Teste 4

(e) Teste 5: Interferência em TV Digital com U.E. operando em frente à antena log-periódica receptora do sinal de TV

No Teste 5, o *eNodeB* (sentido de *downlink*) e U.E. (sentido de *uplink*) operaram com potência de 39 dBm e 23 dBm, respectivamente. Todas as outras configurações dos *links* vítima e interferente se mantiveram as mesmas em relação ao Teste 4, indicadas no Anexo C (e).

A Figura 4.21 apresenta uma comparação entre os resultados medidos e simulados do Teste 5 para os canais 49 e 50, o resultado simulado está de acordo com a medida. A Figura 4.22 mostra o cenário real do Teste 5 no simulador SEAMCAT [13], com o U.E. foi posicionado em frente à antena log-periódica de recepção de TV Digital, a uma distância de 1,5 m.

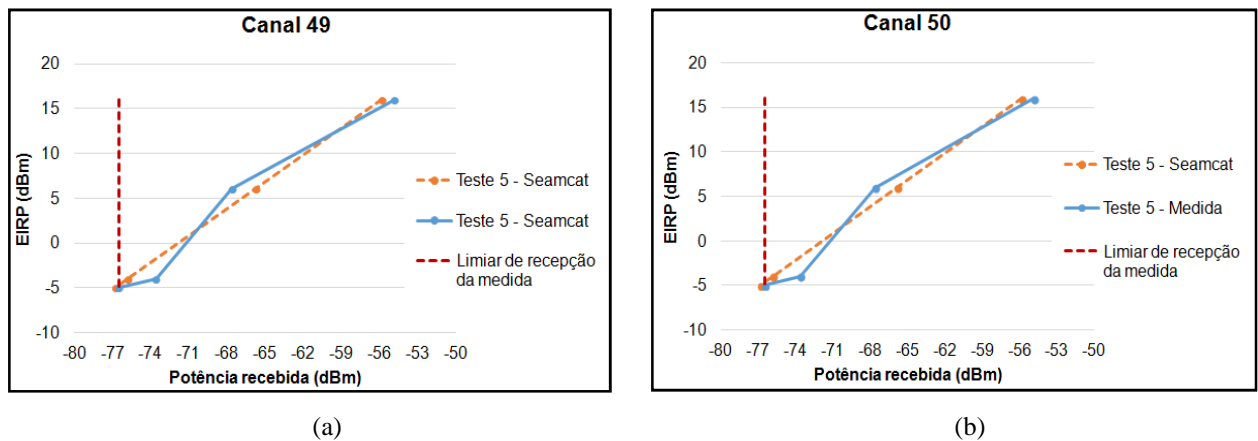


Figura 4.21: Resultados comparativos entre simulação e medida do Teste 5 para os canais (a) 49 e (b) 50

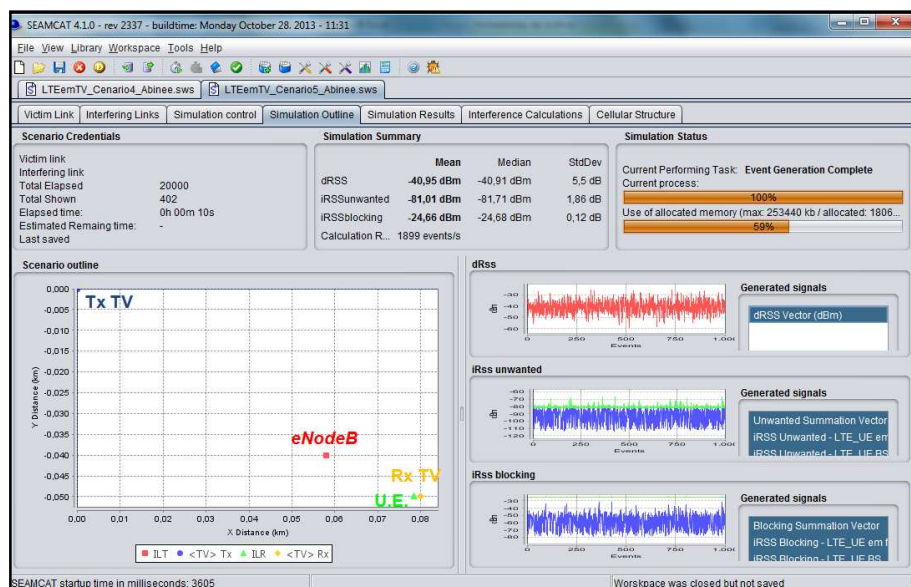


Figura 4.22: Simulação do Teste 5 no SEAMCAT: sistema de TV Digital canal 51 (modo *full-seg*) e sistema LTE (*downlink* e *uplink*) presentes.

(f) Teste 6: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando em 46 dBm

No Teste 6, o *eNodeB* (sentido de *downlink*) e U.E. (sentido de *uplink*) operaram com potência de 46 dBm ou 40 W e 23 dBm, respectivamente. Todas as outras configurações dos *links* vítima e interferente se mantiveram as mesmas em relação ao Teste 5, indicadas no Anexo C (f).

A Figura 4.23 mostra o cenário do Teste 6 no simulador SEAMCAT [13]. Neste teste, o U.E. foi posicionado em frente à antena receptora de TV Digital, modelo log-periódica, a uma distância de 1 m. A Figura 4.24 apresenta a máscara de emissão do interferente (*eNodeB*).

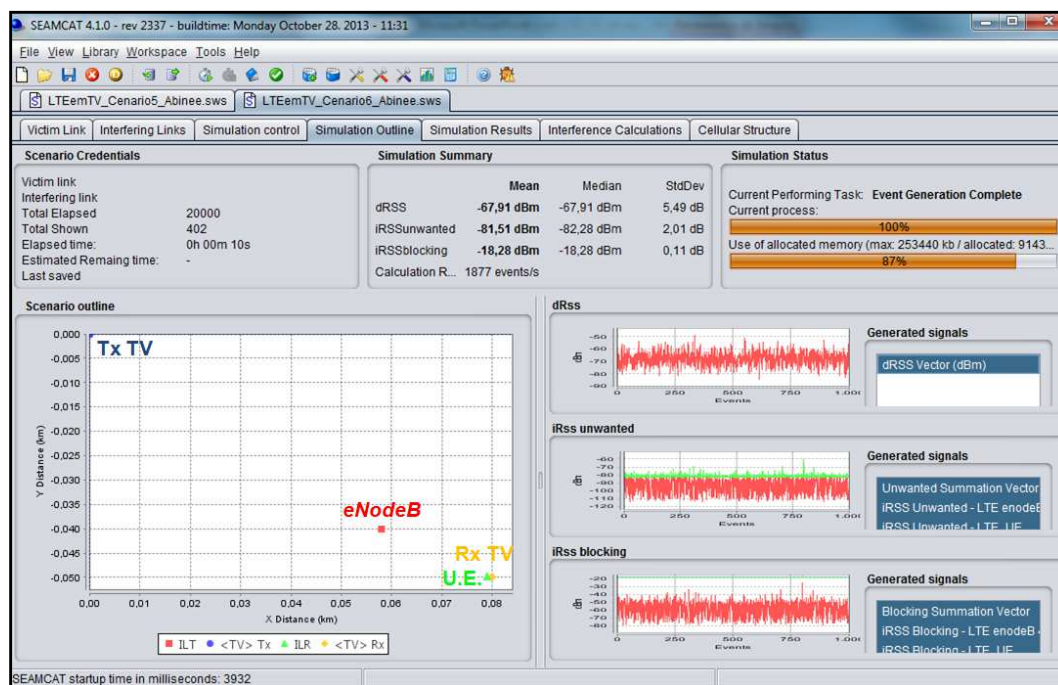


Figura 4.23: Simulação do Teste 6 no SEAMCAT: sistema de TV Digital canal 51 (modo *full-seg*) e sistema LTE (*downlink* e *uplink*) presentes.

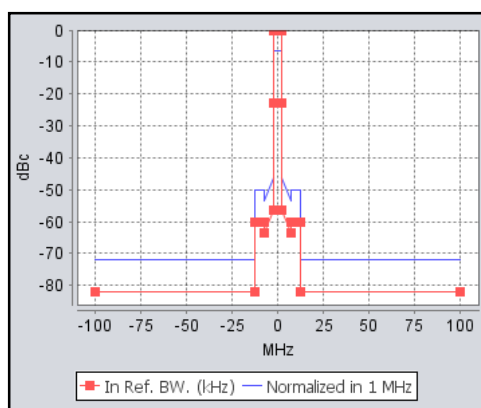


Figura 4.24: Máscara de emissão do *eNodeB* usada no Teste 6

A Figura 4.25 apresenta uma comparação entre os resultados medido e simulado para a configuração do Teste 6. O resultado simulado está de acordo com a medida. Consideradas as limitações das medições, a concordância pode ser considerada boa.

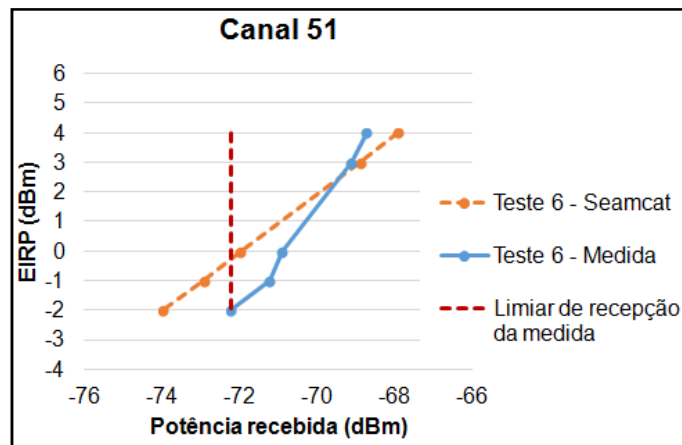


Figura 4.25: Resultado comparativo entre simulação e medida do Teste 6 para canal 51

(g) Teste 7: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando em 39 dBm

No Teste 7, o *eNodeB* (sentido de *downlink*) e U.E. (sentido de *uplink*) operaram com potência de 39 dBm ou 8 W e 23 dBm, respectivamente. Todas as outras configurações dos *links* vítima e interferente se mantiveram as mesmas em relação ao Teste 6, indicadas no Anexo C (g). Neste teste, o U.E. foi posicionado em frente à antena receptora de TV Digital, modelo log-periódica, a uma distância de 1 m.

A Figura 4.26 apresenta uma comparação entre os resultados medidos e simulados entre os Testes 6 e 7. O resultado simulado do Teste 7 mostra boa concordância com as medições [46]44.

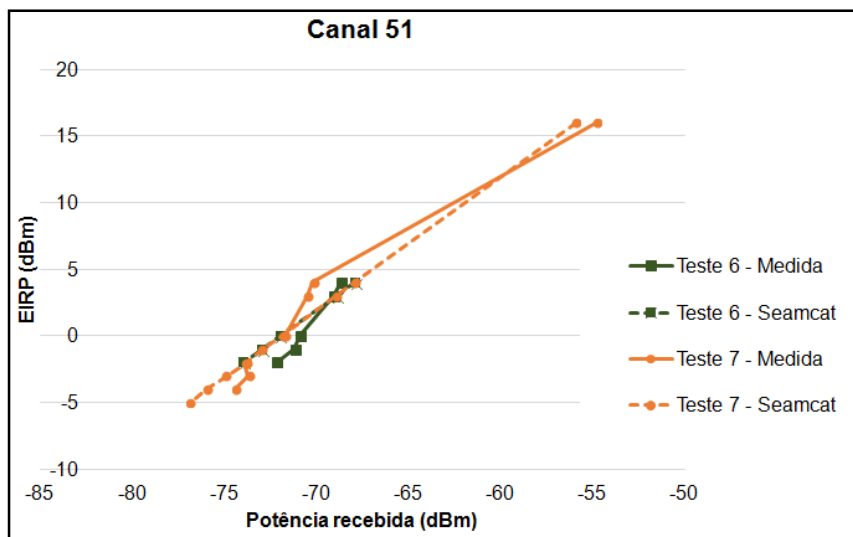


Figura 4.26: Resultados comparativos entre Testes 6 e 7

4.3.3.

Resultados simulados da probabilidade de interferência

A seguir, serão apresentados os resultados simulados da probabilidade de interferência (IP) referentes aos cenários avaliados, definida no item 4.2.

A Figura 4.27 exibe a IP para o caso em que o *eNodeB* está ligado e interferindo o sistema vítima. Neste caso, o limiar do receptor de TV Digital é igual a -78,9 dBm, o sinal de TV começa a apresentar defeito para valores menores que o limiar. À medida que a IP vai aumentando, o sinal desejado no receptor-vítima vai se tornando mais fraco. Com a introdução de mais um interferente, o U.E., o sistema de recepção da TV se torna ligeiramente mais sensível à interferência e o seu limiar aumenta para -76,5 dBm. Verificou-se que a IP chegou a 100% quando o receptor de TV atingiu seu limiar de recepção [44] [45].

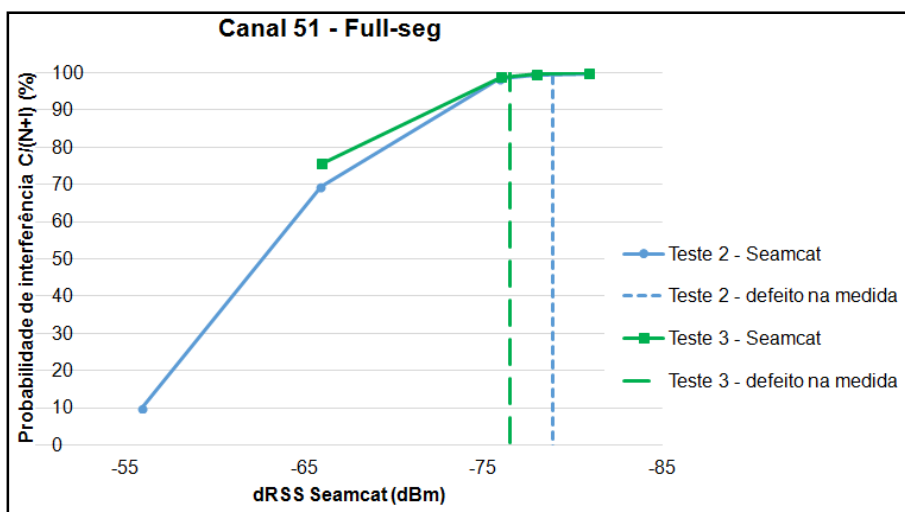


Figura 4.27: IP (modo *full-seg*) entre Testes 2 e 3

A Figura 4.28 mostra uma análise no modo *one-seg* para a configuração anterior. Os parâmetros usados na simulação do modo *one-seg* se encontram na Tabela C.1 do Anexo C. Este modo apresenta uma resolução mais baixa do que o *full-seg* e os limiares são -68,8 dBm (Teste 2) e -75,3 dBm (Teste 3). O valor de IP é significativamente menor do que no modo *full-seg*.

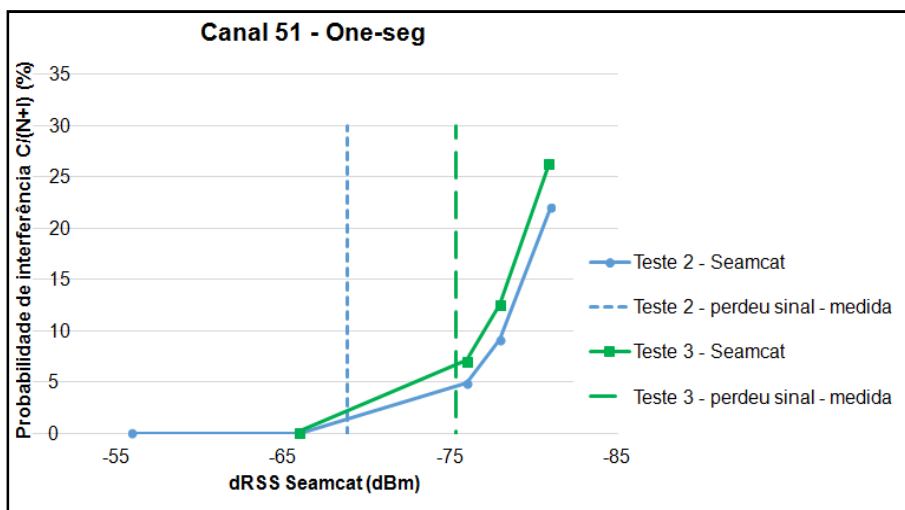


Figura 4.28: IP (modo *one-seg*) entre Testes 2 e 3

A Figura 4.29 exibe a IP para os casos em que o *eNodeB* está ligado e o U.E. está transmitindo ao lado e em frente à antena log-periódica, distanciada a 1,5 m do receptor-vítima. O limiar do receptor de TV Digital foi igual a -76,25 dBm (Teste 4). No caso onde o U.E. está ao lado da antena, verificou-se que o IP atingiu 100% próximo ao limiar de recepção.

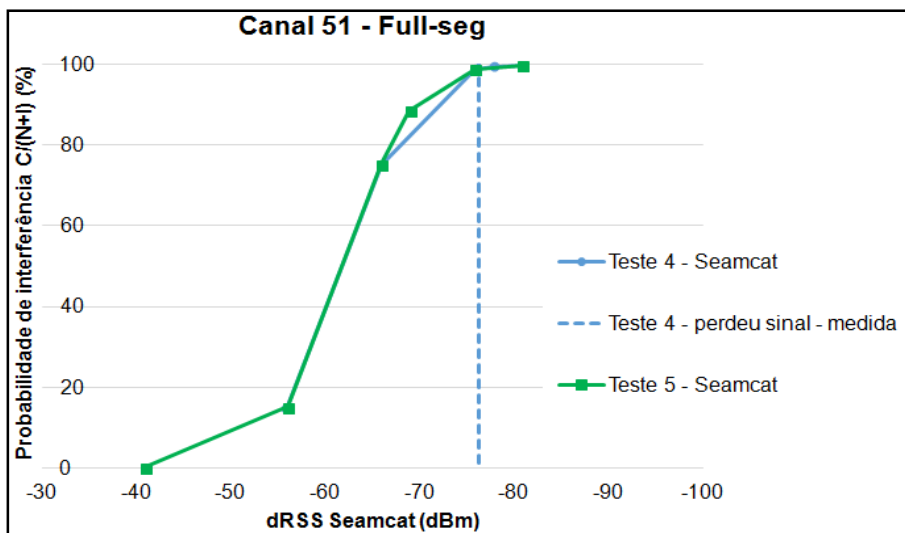


Figura 4.29: IP (modo *full-seg*) entre Testes 4 e 5

A Figura 4.30 mostra uma análise no modo *one-seg* nas configurações anteriores. Os limiares de recepção passaram para -75,5 dBm (Teste 4).

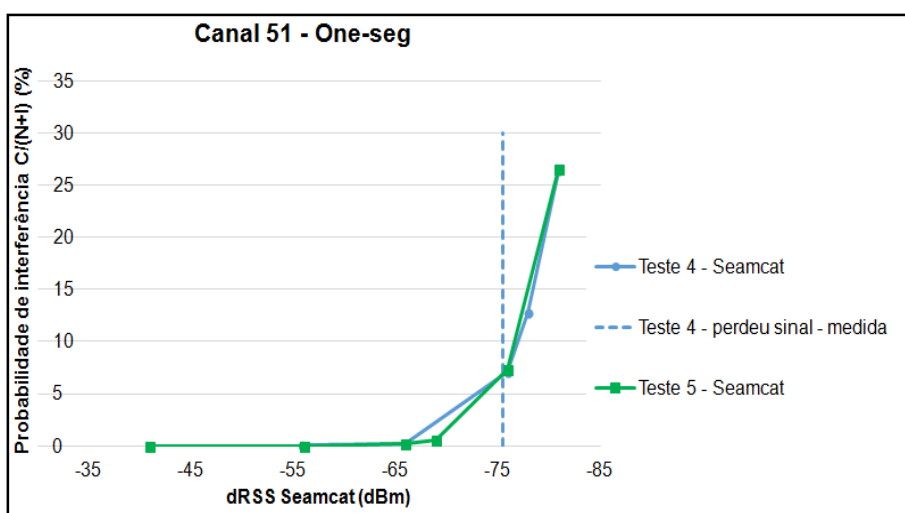


Figura 4.30: IP (modo *one-seg*) entre Testes 4 e 5

A Figura 4.31 exibe a IP para o caso em que o *eNodeB* está transmitindo uma potência máxima de 40 W e o U.E. se localiza em frente à antena log-periódica. O limiar do receptor de TV Digital é igual a -72,2 dBm. Para o caso em que o *eNodeB* está transmitindo uma potência de 8 W e o U.E. está na mesma posição anterior (em frente à antena), o limiar de recepção foi igual a -74,4 dBm. Observa-se a ocorrência de IP de 100% um pouco depois do limiar de recepção.

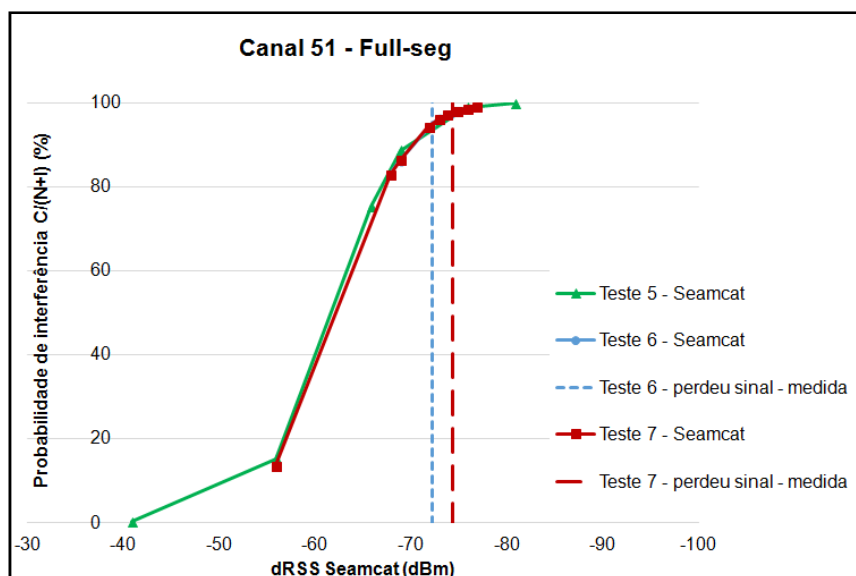


Figura 4.31: IP (modo *full-seg*) nos Testes 5, 6 e 7

A Figura 4.32 mostra uma análise no modo *one-seg* para as configurações anteriores. Nos testes 6 e 7, foi utilizado um receptor que funciona nos modos *one-seg* e *full-seg*. No Teste 6 o sinal de TV não foi medido no modo *one-seg*. Observando os dados medidos no modo *one-seg* do Teste 7, o sinal de TV não sofreu nenhum tipo de defeito aparente e a probabilidade de interferência média calculada foi menor do que 3%.

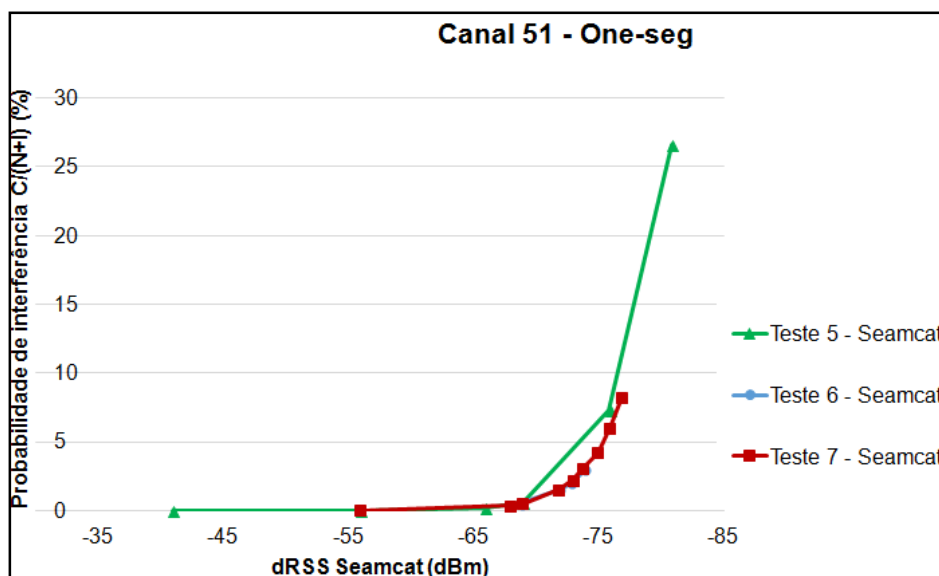


Figura 4.32: IP (modo *one-seg*) entre Testes 5, 6 e 7

5

Simulação da interferência TV Digital-LTE em 700 MHz

5.1.

Interferência do LTE nos receptores de TV Digital

No capítulo anterior, a ferramenta SEAMCAT foi validada através dos resultados obtidos em campo. Para dar continuidade ao processo de avaliação da convivência entre os sistemas LTE e TV Digital em bandas adjacentes, novos cenários de interferências foram considerados, incluindo múltiplos sinais interferentes e múltiplos receptores de TV, com o propósito de reproduzir problemas mais realistas.

Nas análises deste capítulo, o cenário de simulação do LTE foi constituído por macrocélulas, que são células tipicamente usadas em zonas urbanas, para oferecer ampla cobertura e capacidade para os usuários da rede móvel. A geometria padrão da rede celular utilizada pelo simulador é a hexagonal e foi configurada com 57 setores dispostos num *cluster* de 19 células, como mostra a Figura 5.1. Este número foi escolhido considerando a possibilidade da existência de redes com altos fatores de reuso.

Cada estação-base (*eNodeB* ou BS) atende um certo número de usuários móveis. Este valor é um parâmetro de entrada para o simulador e corresponde à quantidade de móveis por célula que será gerado no sistema, sendo cada U.E. adicionado à lista da estação-base à qual se conecta. Já o número de usuários ativos de cada estação-base é calculado através da razão entre o número de subportadoras disponíveis para cada BS e de subportadoras para cada U.E.'s (ambos parâmetros de entrada).

A técnica de acesso OFDMA foi usada para os enlaces de *uplink* e *downlink* do LTE. Este esquema é uma versão da tecnologia de multiportadoras OFDM, que oferece acesso múltiplo de modo flexível. Para a transmissão do sinal LTE, o OFDM subdivide a banda disponível em várias subportadoras (*Resource Blocks* –

RB's) de banda estreita (180 kHz) mutuamente ortogonais, que podem transmitir fluxos de informações independentes entre si.

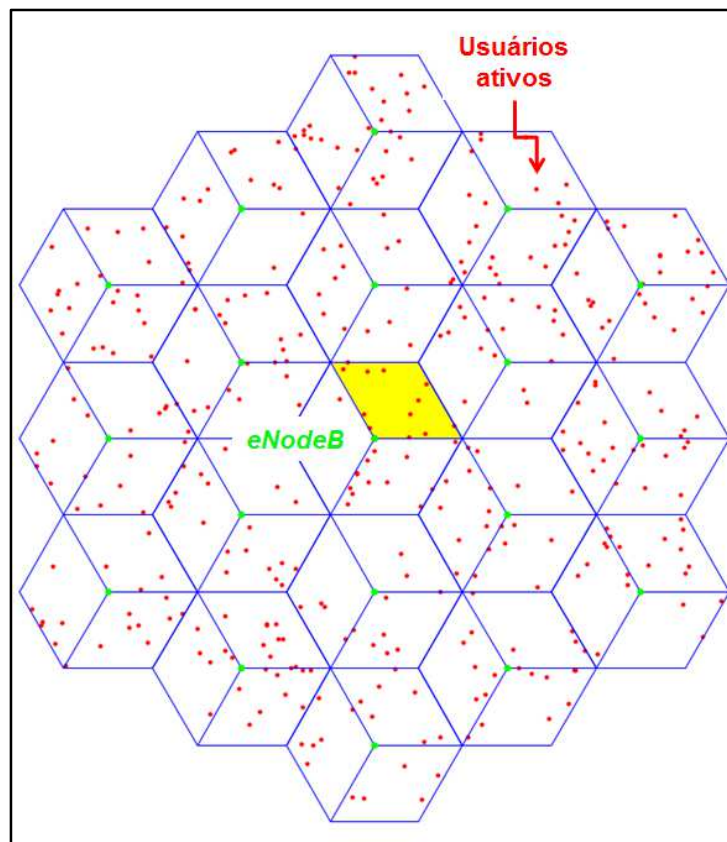


Figura 5.1: Macrocélula tri-setorizada com *eNodeB* posicionado no centro de cada célula

No OFDMA, esta subdivisão da banda é utilizada para compartilhar as subportadoras entre vários usuários [6]. O algoritmo do OFDMA LTE no SEAMCAT permite a avaliação de interferência apenas para sistemas totalmente ocupados (100% de tráfego de dados).

Na tecnologia LTE, modo *uplink*, cada usuário transmite sua própria subportadora, enquanto que no SEAMCAT cada usuário transmite a mesma quantidade de subportadoras e, conseqüentemente, possui a mesma máscara de emissão. No modo *downlink*, as estações-base do sistema utilizam a mesma máscara de emissão em todas as suas subportadoras [13].

Nos cenários a seguir, o sistema interferente LTE e o sistema vítima (TV Digital) foram construídos de forma independente no simulador. Estes cenários de simulação apresentam células hexagonais, que correspondem ao sistema LTE, localizadas dentro da área de cobertura da TV Digital, como mostra a Figura 5.2.

Os seguintes cenários foram avaliados, utilizando a probabilidade de interferência para avaliar o efeito do sinal desejado nos receptores de TV:

- Cenário 1: LTE DL e LTE UL interferem nos receptores de TV Digital dentro de áreas de cobertura de 10 km (Cenário 1.1) e 20 km (Cenário 1.2). O raio da célula do sistema LTE é de 2 km.
- Cenário 2: LTE DL e LTE UL interferem nos receptores de TV Digital com áreas de cobertura de 10 km (Cenário 2.1) e 20 km (Cenário 2.2). Neste caso, o raio da célula do sistema LTE foi reduzida para 1 km para avaliar o efeito em comparação com o cenário 1.
- Cenário 3: LTE DL e LTE UL interferem nos receptores de TV Digital com áreas de cobertura de 10 km (Cenário 3.1) e 20 km (Cenário 3.2). O raio da célula do sistema LTE é de 2 km. A potência de transmissão dos U.E.'s foi reduzida, como forma de mitigação da interferência, até que o valor de IP ficasse abaixo de 5%.

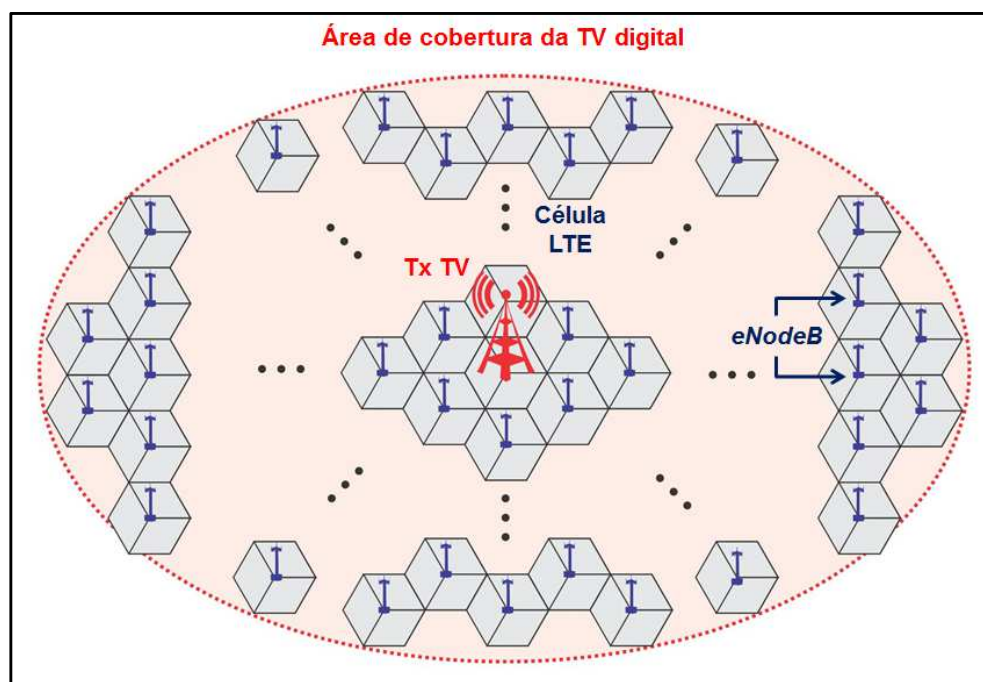


Figura 5.2: Cenário de simulação de interferência [5]

Os parâmetros configurados no simulador se encontram no Anexo D. Durante o processo de configuração dos parâmetros tomou-se o cuidado de respeitar tanto os valores de referências de normas internacionais e nacionais, quanto os valores típicos usados pelas operadoras de radiodifusão e telefonia

móvel. No SEAMCAT é possível inserir diagramas de radiação como dado de entrada. Duas antenas transmissoras típicas de TV e do sistema LTE foram escolhidas, indicadas no Anexo D.

No sistema vítima, o canal de TV avaliado foi o 51 (695,142857 MHz) já que, segundo as análises anteriores, este canal é o mais suscetível às interferências de canal adjacente do sistema LTE.

No sistema LTE UL, a frequência escolhida foi 713 MHz que corresponde ao canal 54 da TV. Este valor é a frequência central da primeira banda adjacente (708 a 718 MHz) leiloadada pela ANATEL, em 2014, como mostra a Tabela 5.1. Para o LTE DL, a frequência central foi 768 MHz.

Tabela 5.1: Resultados do leilão da faixa de 700 MHz [47]

Operadora	Bandas de <i>uplink</i>	Bandas de <i>downlink</i>
CTBC	708 a 718 MHz	763 a 773 MHz
TIM	718 a 728 MHz	773 a 783 MHz
Vivo	728 a 738 MHz	783 a 793 MHz
Claro	738 a 748 MHz	793 a 803 MHz

As faixas de 703 a 708 MHz e 758 a 763 MHz foram destinadas ao SLP (Serviço Limitado Privado) para aplicações de segurança pública, defesa nacional e infraestrutura, em caráter primário [32]. Existem três bandas de guarda disponíveis na faixa de 700 MHz, uma de 5 MHz disposta entre o fim da faixa de TV Digital e o início da primeira faixa do SLP, outra de 10 MHz localizada entre o fim da faixa do LTE UL e o início da segunda faixa do SLP e por último de 3 MHz que se encontra no final da faixa de LTE. A Tabela 5.2 mostra a canalização do espectro após o leilão:

Tabela 5.2: Canalização do espectro após o leilão

TV	BG*	SLP	LTE UL	BG*	SLP	LTE DL	BG*
470 a 698 MHz	698 a 703 MHz	703 a 708 MHz	708 a 748 MHz	748 a 758 MHz	758 a 763 MHz	763 a 803 MHz	803 a 806 MHz

* Banda de Guarda

A largura de banda do LTE é de 10 MHz e 24 subportadoras foram alocadas para 2 usuários ativos por setor, na simulação. De acordo com [27], o número de RB's associado à largura de banda do canal de 10 MHz é 50, mas para diminuir o

custo computacional, este número foi reduzido para 24. Mesmo com a redução deste valor, foi possível obter uma taxa de transmissão de 1,2 Mbps para o sistema LTE UL. Segundo [48], as quatro operadoras 4G avaliadas oferecem, em contrato para seus clientes, uma taxa de 500 kbps de *upload*. Assim, a escolha de 24 subportadoras não prejudicou o desempenho do sistema LTE no SEAMCAT.

As máscaras de emissão tanto para o U.E. e *eNodeB* foram calculadas com base nos relatórios do 3GPP [26] e [27], respectivamente, e podem ser vistas na Figura 5.3.

Os modelos de propagação utilizados foram o ITU-R P.1546-4 [49] para o enlace do sistema de TV Digital, *Extended Hata* para o enlace do LTE e também para o enlace entre a estação-base e o receptor de TV, e o *Extended Hata* – SRD para o enlace entre U.E. e o receptor de TV, pois a distância de separação é de 1 ou 2 m, apenas. Todos os parâmetros dos modelos de propagação são referentes ao ambiente urbano.

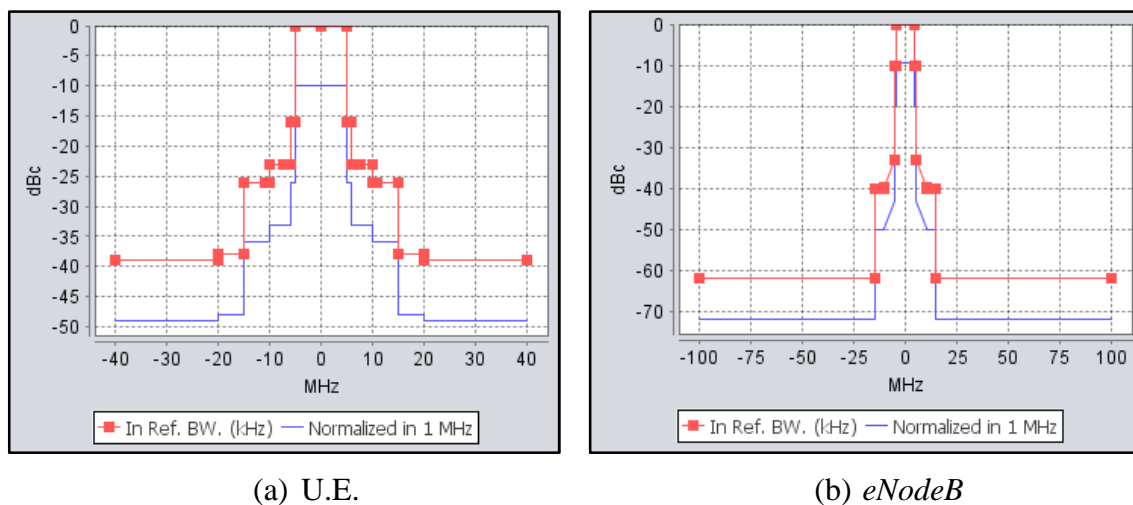


Figura 5.3: Máscaras de emissão dos equipamentos U.E. e *eNodeB* para banda de 10 MHz

Para avaliar o efeito do sinal desejado (dRSS) nos receptores de TV Digital, a probabilidade de interferência (IP) foi calculada para raios de cobertura do sistema de TV de 10 e 20 km. O raio da célula do LTE foi, inicialmente, de 2 km, valor típico segundo [50]. O cenário composto pelos elementos de ambos os sistemas está representado na Figura 5.4. A distância entre o transmissor de TV (Tx TV) e o *eNodeB* mais próximo é de 10 m, conforme a visão ampliada da Figura 5.5. Os U.E.'s estão localizados em ambiente *indoor* a 1 m de distância dos

receptores de TV. Em [51] são apresentados resultados de medições de interferência de *uplink* em receptor de TV, com antena interna, e distâncias variando de 0,5 a 2,5 m, com U.E.'s posicionados a 1,5 m do chão. No nosso caso, a altura do U.E. foi escolhida a 1 m do chão, levando em consideração que o usuário normalmente está sentado em frente à antena interna de TV.

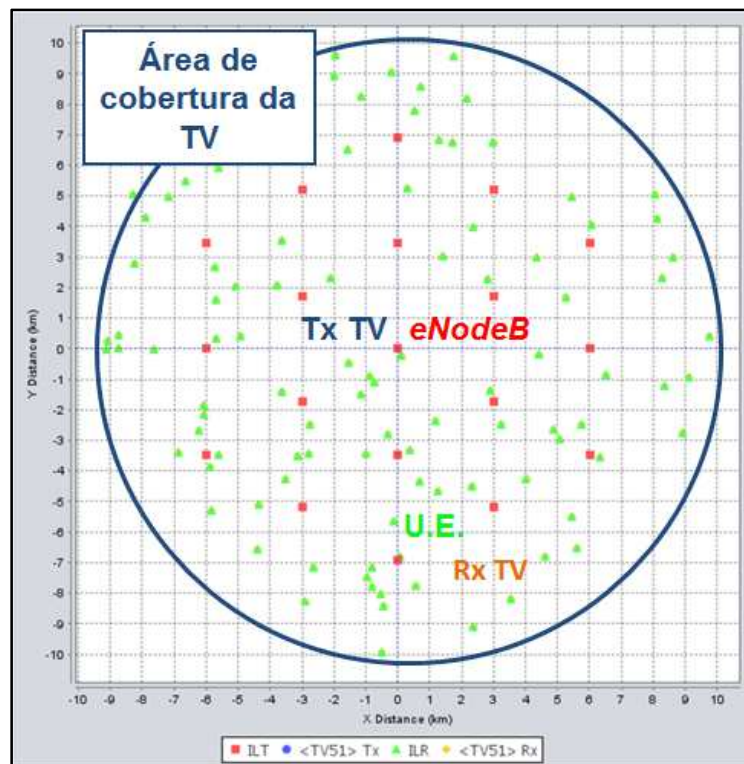


Figura 5.4: Cenário de interferência com raio de cobertura de TV de 10 km

Na simulação, o algoritmo do SEAMCAT constrói a rede celular e, em seguida, preenche as células com U.E.'s aleatoriamente na região de simulação, de acordo com o número de subportadoras alocadas para cada *eNodeB* e U.E.. Assim, o preenchimento das células dependerá do número de usuários ativos.

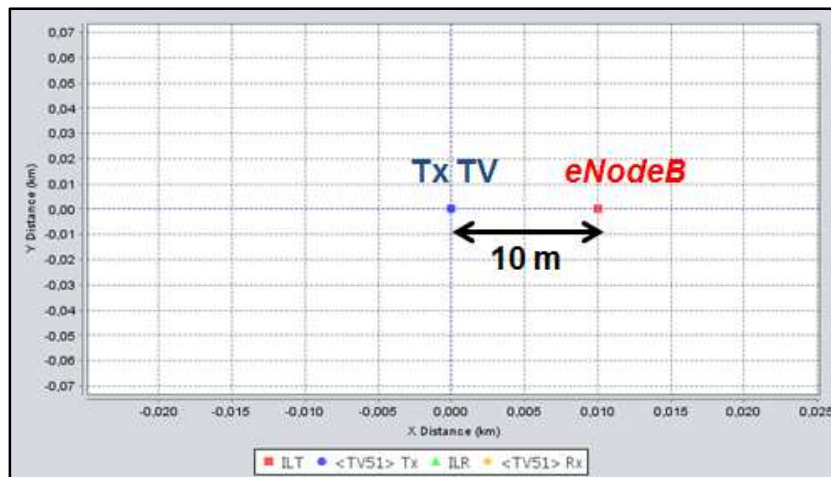


Figura 5.5: Vista ampliada da Figura 5.4

Para avaliar o comportamento da rede celular, a técnica *wrap-around* foi usada para eliminar os efeitos de limitação das bordas e reduzir o número de células no cenário de simulação, reduzindo o custo computacional. Desta forma, a rede celular que utiliza esta técnica torna-se infinita [52]. O SEAMCAT permite, assim, simular uma rede celular infinita a partir de um modelo finito.

Os resultados foram obtidos para a probabilidade de interferência de bloqueio (IP *Blocking*) e da relação sinal-ruído mais interferência. A IP *blocking* está relacionada com as imperfeições de seletividade do receptor de TV, que captura sinais interferentes adjacentes à sua banda. Foi usada nas simulações a máscara de bloqueio no receptor de TV para atenuar estes sinais indesejados. A máscara usada nas simulações corresponde à curva de resposta de um protótipo de filtro passa-baixa (Figura 5.6), da empresa *Proeletronic*, usado pela ANATEL em seus testes de mitigação de interferência na faixa de 700 MHz [7].



Figura 5.6: Curva de resposta do filtro LTE – Proeletronic [7]

Na simulação, o SEAMCAT calculou a *IP blocking* média de até 100 mil eventos (*snapshots*), número que é configurado pelo usuário. Para obter resultados confiáveis, este número deve ser maior que 20 mil eventos [13].

Os níveis dos sinais desejados (dRSS) e interferentes (iRSS) são comparados com o critério de interferência escolhido, que servirá para o cálculo de IP, cuja condição é que o nível do sinal desejado (dRSS) seja maior do que a sensibilidade do receptor-vítima ($dRSS > \text{sensibilidade de } -77,42 \text{ dBm}$). O SEAMCAT calcula a IP do receptor-vítima, como:

$$IP = 1 - P_{NI}, \quad (5.1)$$

onde, P_{NI} é a probabilidade de não-interferência (NI) do receptor. O cálculo de P_{NI} envolve duas condições: a razão dRSS/iRSS deve ser maior que o critério de interferência escolhido (C/I , $C/N+I$, $N+I/N$ ou I/N) e dRSS deve ser maior que a sensibilidade do receptor-vítima.

Além da interferência de bloqueio é preciso considerar a interferência causada pelas emissões indesejadas (emissões espúrias e fora de faixa do transmissor-interferente) dos transmissores do sistema LTE que caem na banda do receptor de TV. A probabilidade de interferência neste caso é denominada *IP unwanted* e é calculada pelo SEAMCAT considerando as máscaras de transmissão dos interferentes, a seletividade do receptor-vítima, a separação de frequências entre interferente e vítima, o ganho das antenas e a perda de propagação.

A seguir, serão apresentados os resultados da análise de interferência do LTE nos receptores de TV Digital.

(a) Cenário 1.1: Efeito do sinal desejado no cenário com raio de cobertura da TV Digital de 10 km

Os seguintes resultados foram obtidos para a probabilidade de interferência de bloqueio (*IP Blocking*) e da relação sinal-ruído mais interferência, para o caso com o raio de cobertura da TV de 10 km, no qual a EIRP do sistema de TV foi variada entre 60, 70 e 80 dBm.

Na Figura 5.7, o parâmetro $dRSS-iRSS$ corresponde à razão entre a intensidade do sinal desejado ($dRSS$) e a intensidade do sinal interferente ($iRSS$) que chega no receptor-vítima. Quanto maior a razão $dRSS-iRSS$ (C/I), menor a *IP*.

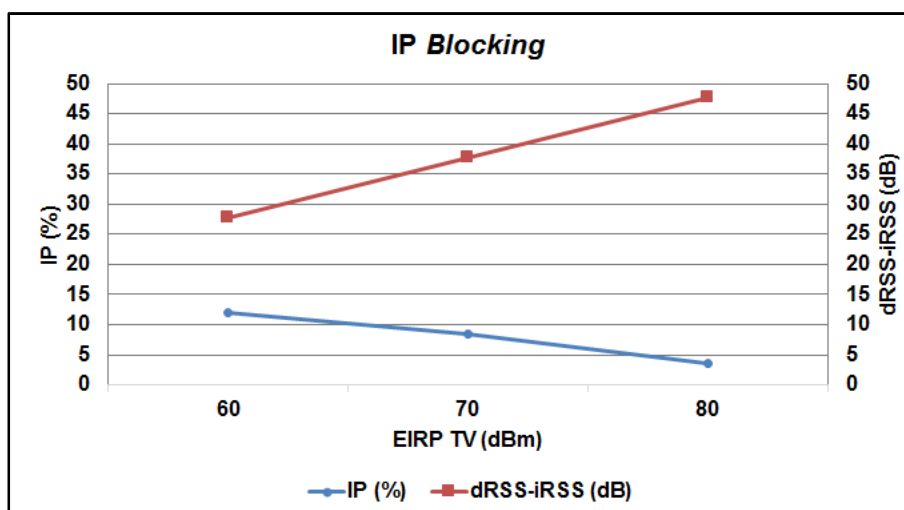


Figura 5.7: Resultados da probabilidade de bloqueio (*blocking*) e da razão C/I do Cenário 1.1

A Figura 5.8 mostra os resultados simulados da *IP unwanted*, da *IP blocking* e da combinação de ambos, a *IP total*. Observa-se que a *IP total* não é a soma das outras duas, pois existirão eventos em que o limite de interferência é excedido por ambos os efeitos. Para este cenário avaliado, a interferência dominante é a de bloqueio, refletindo a menor eficiência dos filtros do receptor de TV [46].

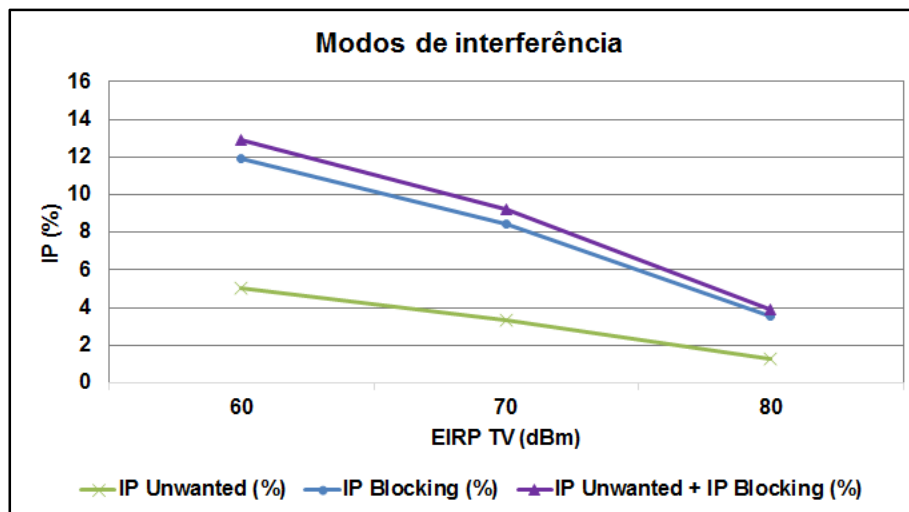


Figura 5.8: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência do Cenário 1.1

A Figura 5.9 mostra como variam, com a EIRP do transmissor de TV, a *IP total* e o número de eventos válidos, isto é, eventos em que o sinal desejado no receptor de TV está acima do limiar. Quanto maior a probabilidade destes eventos válidos acontecerem, menor o valor de *IP*. Analisando o caso em que a EIRP da TV é 70 dBm, o SEAMCAT calculou 84 mil eventos válidos, mas que não foram suficientes para manter um valor de *IP total* menor que 5%, pois seu valor foi de 8,5%.

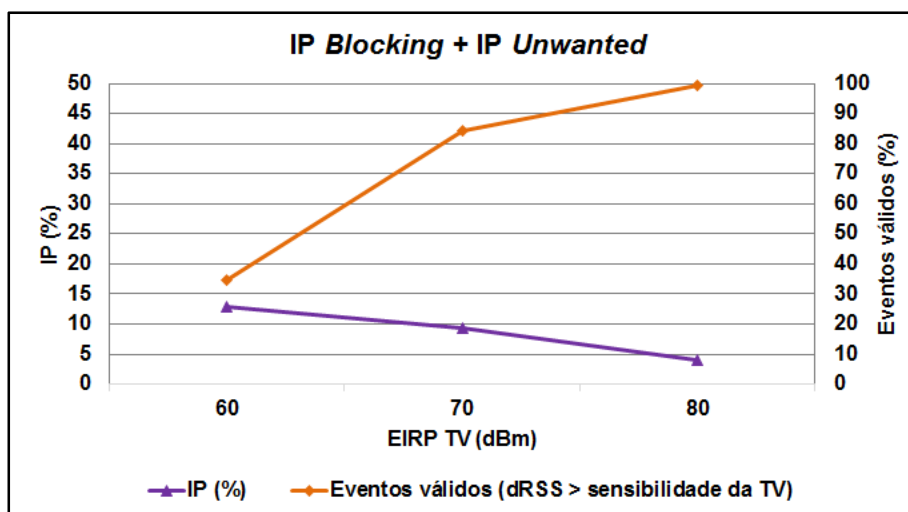


Figura 5.9: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (*blocking*) e indesejada (*unwanted*) e da percentagem de eventos válidos do Cenário 1.1

De acordo com [53], uma IP inferior a 5% pode ser considerada suficiente como nível de proteção aceitável do sistema de TV. Assim, este valor foi usado como referência nas análises de interferência.

O LTE, operando no primeiro bloco de sua faixa, causa interferências maiores que 5% dos 100 mil eventos simulados para o transmissor de TV com EIRP's iguais a 60 e 70 dBm. Para este cenário, o único caso em que a IP atende o valor limite de interferência de 5% corresponde a uma EIRP da TV de 80 dBm (classe especial), com o valor de IP total igual a 3,91%.

(b) Cenário 1.2: Efeito do sinal desejado no cenário com raio de cobertura da TV Digital de 20 km

O cenário composto pelos elementos de ambos os sistemas está representado na Figura 5.10. A única diferença entre este caso e o anterior é a mudança do raio de cobertura do sistema de TV para 20 km de modo a verificar se a redução de sinal nos receptores de TV mais distantes provoca aumento significativo na probabilidade de interferência.

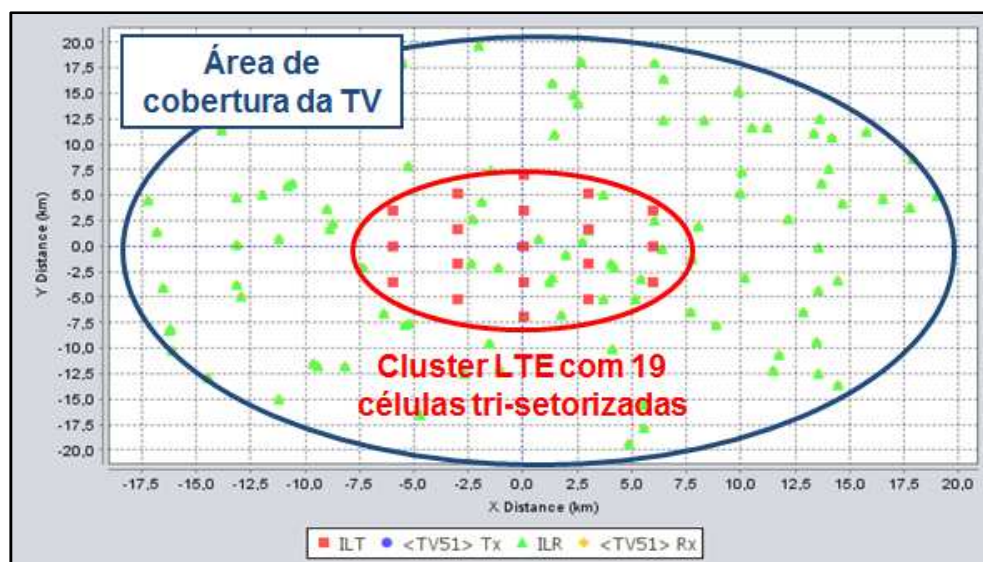


Figura 5.10: Cenário de interferência com raio de cobertura de TV de 20 km

Verificou-se que, neste cenário, a interferência dominante também é o *blocking*, como mostra a Figura 5.11.

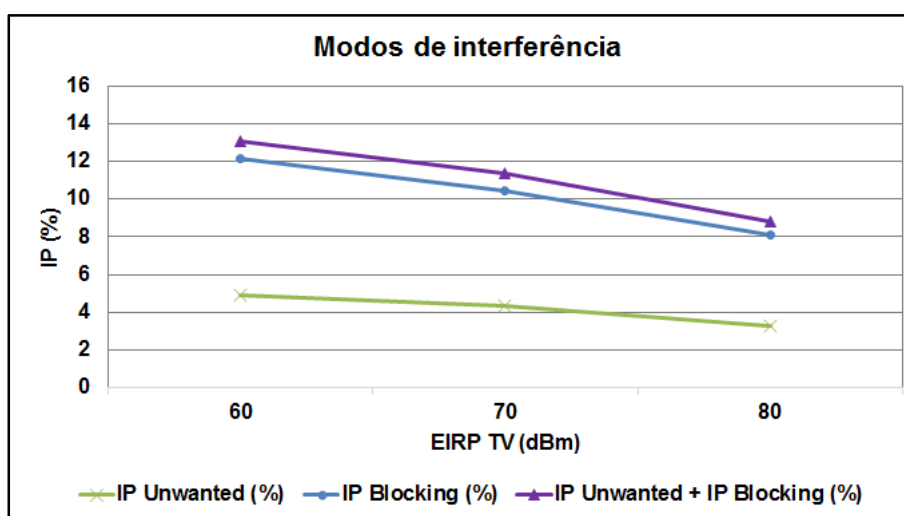


Figura 5.11: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência do Cenário 1.2

Como esperado, a razão $dRSS/iRSS$ diminui com o aumento do raio de cobertura da TV, pois o sinal desejado chegará mais fraco nos receptores-vítima que estão na borda de cobertura. Assim, a probabilidade de interferência, mostrada na Figura 5.12, apresenta um aumento em relação aos resultados do Cenário 1.1.

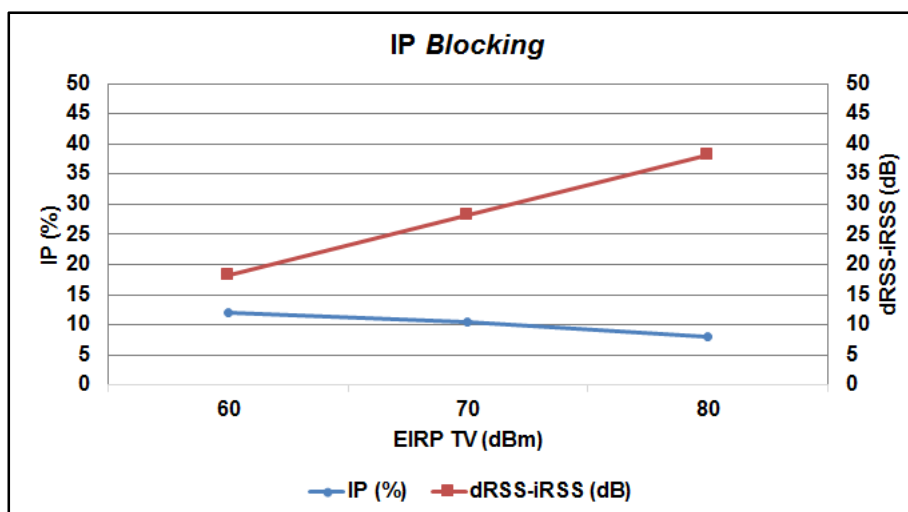


Figura 5.12: Resultados da probabilidade de bloqueio (*blocking*) e da razão C/I do Cenário 1.2

Os valores de IP total dos Cenários 1.1 e 1.2 são mostrados na Tabela 5.3. [46]. Neste caso, para os três valores de EIRP avaliados, a IP total do Cenário 1.2 ultrapassou o limite de interferência de 5%. Isto está associado à significativa redução da relação C/I média, como mostra a Tabela 5.4 [46].

Tabela 5.3: Resultados de IP total dos Cenários 1.1 e 1.2

EIRP da TV (dBm)	IP total (%) Cenário 1.1	IP total (%) Cenário 1.2
60	12,91 (> 5%)	13,1 (> 5%)
70	9,23 (> 5%)	11,33 (> 5%)
80	3,91 (OK)	8,8 (> 5%)

Tabela 5.4: Resultados da razão C/I dos Cenários 1.1 e 1.2

EIRP da TV (dBm)	dRSS/iRSS (dB) Cenário 1.1	dRSS/iRSS (dB) Cenário 1.2
60	27,7	18,27
70	37,77	28,21
80	47,75	38,2

Como mostram a Figura 5.13 e Tabela 5.5, a percentagem de eventos válidos cai, significativamente, em relação ao caso anterior. Apenas com a EIRP de 80 dBm tem-se um cenário que pode ser considerado válido, com 80% dos usuários com nível de sinal recebido acima do limiar.

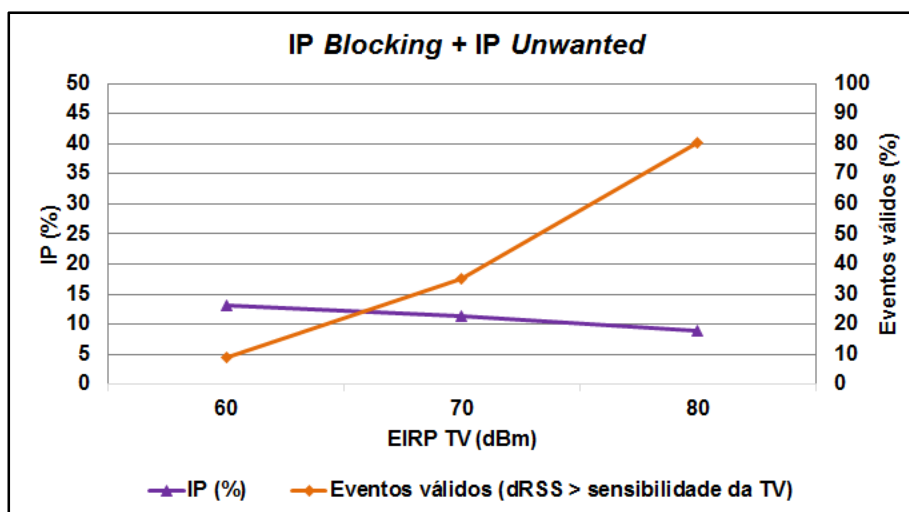


Figura 5.13: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (*blocking*) e indesejada (*unwanted*) e da percentagem de eventos válidos do Cenário 1.2

Tabela 5.5: Resultados comparativos da percentagem de eventos dos Cenários 1.1 e 1.2 [46]

EIRP da TV (dBm)	Percentagem de eventos válidos (%) no Cenário 1.1	Percentagem de eventos válidos (%) no Cenário 1.2
60	34,58	9,17
70	84,37	35,32
80	99,55	80,38

(c) Cenário 2.1: Efeito do sinal interferente no cenário com raio de cobertura da TV Digital de 10 km

Para avaliar o efeito da densidade de estações rádio-base (*eNodeB*), a simulação com raio de cobertura de TV de 10 km foi realizada alterando, apenas, o raio das células de 2 km para 1 km. As Tabelas 5.6 a 5.8 apresentam a comparação das probabilidades de interferência, relação C/I e percentagem de eventos válidos obtidos neste cenário com os obtidos com o raio de célula de 2 km.

Observa-se que a redução do raio da célula do *eNodeB* não provocou alterações significativas nos parâmetros avaliados, sugerindo que o efeito do interferente dominante é o provocado pelas U.E.'s e não o dos *eNodeB*.

Tabela 5.6: Resultados comparativos de IP total dos Cenários 1.1 e 2.1

EIRP da TV (dBm)	IP total (%) Cenário 1.1	IP total (%) Cenário 2.1
60	12,91 (> 5%)	13 (> 5%)
70	9,23 (> 5%)	9,14 (> 5%)
80	3,91 (OK)	3,96 (OK)

Tabela 5.7: Resultados comparativos da razão C/I dos Cenários 1.1 e 2.1

EIRP da TV (dBm)	dRSS/iRSS (dB) Cenário 1.1	dRSS/iRSS (dB) Cenário 2.1
60	27,7	27,73
70	37,77	37,8
80	47,75	47,89

Tabela 5.8: Resultados comparativos da percentagem de eventos dos Cenários 1.1 e 2.1

EIRP da TV (dBm)	Percentagem de eventos válidos (%) no Cenário 1.1	Percentagem de eventos válidos (%) no Cenário 2.1
60	34,58	34,61
70	84,37	84,45
80	99,55	99,53

(d) Cenário 2.2: Efeito do sinal interferente no cenário com raio de cobertura da TV Digital de 20 km

Neste cenário, com raio das células de 1 km, o raio de cobertura da TV foi aumentado para 20 km. As Tabelas 5.9 a 5.11 mostram que também não houve alterações significativas nos parâmetros avaliados, confirmando os resultados obtidos no teste anterior.

Tabela 5.9: Resultados comparativos de IP total dos Cenários 1.2 e 2.2

EIRP da TV (dBm)	IP total (%) Cenário 1.2	IP total (%) Cenário 2.2
60	13,1 (> 5%)	12,22 (> 5%)
70	11,33 (> 5%)	11,37 (> 5%)
80	8,8 (> 5%)	8,65 (> 5%)

Tabela 5.10: Resultados comparativos da razão C/I dos Cenários 1.2 e 2.2

EIRP da TV (dBm)	dRSS/iRSS (dB) Cenário 1.2	dRSS/iRSS (dB) Cenário 2.2
60	18,27	18,28
70	28,21	28,18
80	38,2	38,26

Tabela 5.11: Resultados comparativos da percentagem de eventos dos Cenários 1.2 e 2.2

EIRP da TV (dBm)	Percentagem de eventos válidos (%) no Cenário 1.2	Percentagem de eventos válidos (%) no Cenário 2.2
60	9,17	9,27
70	35,32	34,99
80	80,38	80,27

(e) Cenário 3.1: Mitigação de interferência no cenário com raio de cobertura da TV Digital de 10 km

Os resultados obtidos, nos cenários considerados até aqui, indicam que apenas no caso do transmissor de TV operando com a EIRP máxima de 80 dBm (classe especial) com um raio de cobertura de 10 km, a probabilidade de interferência fica abaixo do valor limite estabelecido de 5%. Nos demais casos, alguma técnica de mitigação de interferências deve ser usada para permitir a convivência harmoniosa entre os sistemas de TV Digital e sistemas LTE operando na banda mais próxima do canal 51 de TV.

Possíveis técnicas de mitigação para este problema são a melhoria das máscaras de emissão dos transmissores do sistema LTE, melhoria da máscara de recepção dos receptores de TV ou a limitação da potência dos transmissores do sistema LTE. Como os resultados das simulações indicaram que o efeito dominante é a interferência de bloqueio, os filtros que precisariam ser melhorados são os filtros de recepção dos receptores de TV. Esta solução é pouco viável na prática, não só pela grande quantidade de receptores de TV já em operação como pelo impacto no custo de futuros receptores. A alternativa, no curto e médio prazo, é limitar as potências dos transmissores do sistema LTE como técnica de mitigação de interferência, na tentativa de reduzir o valor da IP total (< 5%).

Nesta análise, foi considerada uma EIRP TV de 70 dBm com raio de cobertura de TV de 10 km e o raio da célula do *eNodeB* de 2 km. O caso com EIRP de 60 dBm foi descartado, pois com uma percentagem de usuários com recepção acima do limiar de apenas 35% não foi considerado viável.

Primeiramente, a potência do *eNodeB* foi reduzida a partir do valor máximo de 46 dBm utilizado no Cenário 1.1. Os resultados são mostrados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Mitigação de interferência do Cenário 1.1 com redução da potência do *eNodeB* [46]

EIRP da TV (dBm)	Potência <i>eNodeB</i> (dBm)	Potência U.E. (dBm)	IP total (%)	dRSS/iRSS (dB)	% de eventos válidos	Situação
70	46	23	9,23	37,77	84,37	> 5%
70	43	23	8,96	37,92	84,3	> 5%
70	40	23	8,87	37,98	84,34	> 5%

Embora ocorra uma pequena redução na probabilidade de interferência, ela não é suficiente para que o limite de 5% seja atingido. Isto já era esperado, uma vez que os testes anteriores mostraram que o efeito interferente dominante é causado pelas transmissões dos U.E.'s. Em seguida, a potência dos U.E.'s foi reduzida a partir do valor máximo de 23 dBm, mantendo-se potência do *eNodeB* em 46 dBm. Os resultados são mostrados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Mitigação de interferência para o Cenário 1.1 com redução da potência do U.E. [46]

EIRP da TV (dBm)	Potência <i>eNodeB</i> (dBm)	Potência U.E. (dBm)	IP total (%)	dRSS/iRSS (dB)	% de eventos válidos	Situação
70	46	20	7,13	40,44	84,3	> 5%
70	46	17	5,54	43,27	84,35	> 5%
70	46	14	4,7	45,75	84,41	OK

Ao reduzir a potência do U.E. para 14 dBm, observamos que a IP total atendeu o limite permitido de interferência. O resultado indica, ainda, que é necessário que a razão dRSS/iRSS média seja maior que, aproximadamente, 45 dB para que haja a convivência harmoniosa entre os sistemas vítima e interferente.

(f) Cenário 3.2: Mitigação de interferência no cenário com raio de cobertura da TV Digital de 20 km

A análise anterior será repetida para o cenário cujo raio de cobertura é de 20 km. Os casos com EIRP de 60 e 70 dBm foram descartados pois, com percentagens de usuários com recepção acima do limiar de apenas 9% e 35%, respectivamente, não foram considerados viáveis. Os resultados, mostrados na Tabela 5.14, indicam que para atingir valores de probabilidade de interferência inferiores a 5%, também é necessário limitar a potência de transmissão das U.E.'s em 14 dBm.

Tabela 5.14: Mitigação de interferência do Cenário 1.2 com redução da potência do U.E. e aumento da EIRP TV

EIRP da TV (dBm)	Potência <i>eNodeB</i> (dBm)	Potência U.E. (dBm)	IP total (%)	dRSS/iRSS (dB)	% de eventos válidos	Situação
80	46	20	6,66	41,05	80,11	> 5%
80	46	17	5,33	43,92	80,24	> 5%
80	46	14	4,31	46,68	80,31	OK

5.2.

Interferência da TV Digital no LTE

A interferência do sistema de TV Digital no LTE também foi avaliada. Para esta avaliação, é necessário considerar tanto a interferência sobre o sinal recebido nas estações rádio-base (interferência no *uplink*) como a interferência sobre o sinal recebido no equipamento dos usuários (interferência no *downlink*).

5.2.1.

Interferência da TV Digital no *uplink* do sistema LTE

Foi simulada a interferência da TV operando no canal 51 sobre a primeira faixa de LTE *uplink*, que corresponde ao canal 54. Foram considerados níveis de EIRP da TV de 60, 70 e 80 dBm com raios de cobertura de 10 e 20 km.

A TV Digital, operando como sistema interferente, tem o seu nível de emissões fora da banda (*out-of-band*) atenuado por meio de filtragem estabelecida por norma da Anatel. A Figura 5.14 apresenta a máscara de transmissão com as atenuações mínimas das emissões fora da faixa em função do afastamento em relação à portadora central do sinal digital [21].

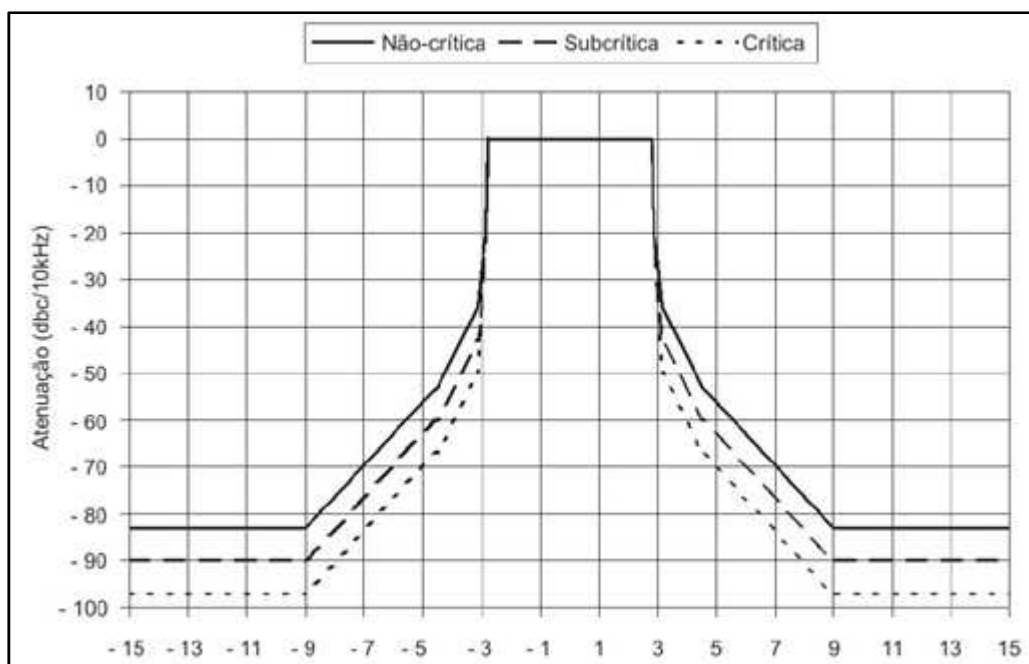


Figura 5.14: Máscara de transmissão do sistema de TV Digital [21]

A escolha da máscara depende da classe da estação transmissora e do número de transmissores em canais de TV adjacentes. A Tabela 5.15 indica os valores máximos da potência de transmissão (ERP – *Effective Radiated Power*) para cada classe e as distâncias máximas ao contorno de serviço, com altura de referência de 150 m acima do nível médio do terreno.

Tabela 5.15: Característica das classes de TV Digital [21]

Classes	Canais	ERP (kW) UHF	Distância máxima (km)
Especial	47 a 68	100	57
A	14 a 68	8	42
B	14 a 68	0,8	29
C	14 a 68	0,08	18

Para as classes Especial e A foram utilizadas as máscaras crítica e não-crítica, respectivamente, pois apenas um transmissor foi considerado na simulação, sem transmissores de TV em canais adjacentes. As classes B e C não foram consideradas porque apresentam valores baixos de ERP para serem usados em zonas urbanas. Os demais parâmetros referentes ao sistema de TV Digital foram os mesmos da análise anterior, indicados no Anexo D (Tabela D.1).

Para o sistema OFDMA UL, o valor de SINR mínimo foi calculado através da equação da vazão (*throughput*) máxima teórica:

$$\text{Throughput} = \frac{1}{\text{Tempo de símbolo}} \times \text{Bits} \times \text{Subportadoras}, \quad (5.2)$$

onde Bits é o número de bits por símbolo da modulação 16-QAM (4 bits/símbolo) com taxa de código igual a 3/4, e Subportadoras é o número de subportadoras que está relacionado com a largura de banda do sistema. A quantidade de subportadoras capazes de transportar dados numa banda de 10 MHz é de 600.

Cada tipo de modulação apresenta um requisito mínimo de SINR. Caso este valor não seja alcançado na célula, a qualidade oferecida pelo sistema poderá ser afetada [54]. O valor de SINR usado na simulação foi o referente à modulação 16-QAM 3/4, igual a 6,76 dB.

O teorema de Shannon-Hartley é considerado como um modelo de capacidade de dados teórica para um determinado canal de comunicação digital sujeito a ruído. A capacidade de Shannon é dada por [54]:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SINR}), \quad (5.3)$$

onde C é a capacidade em bits/segundo, B é a largura de banda do canal em Hz e SINR é a razão sinal, ruído e interferência.

Outro parâmetro de entrada necessário é a curva de ACS. A Universidade Presbiteriana Mackenzie apresentou, em seu relatório de testes de interferência [55], os valores de ACS calculados a partir das relações de proteção medidas conforme o documento [56]. Para o terminal móvel LTE operando na faixa de 703 a 748 MHz e a TV no canal 51, o valor de ACS calculado foi igual a 54 dB, obtido pela eq. (5.4).

$$\text{ACS}(\Delta f) = -10 \log \left(10^{\frac{\text{PR}_0 - \text{PR}(\Delta f)}{10}} - 10^{\frac{\text{ACLR}}{10}} \right), \quad (5.4)$$

onde Δf é a frequência *offset* do interferente, PR_0 é a razão de proteção co-canal e $\text{PR}(\Delta f)$ é a razão de proteção em canal adjacente. A PR é a razão mínima entre o sinal desejado e interferente necessária para garantir a qualidade do sinal desejado [55]. A máscara de ACS utilizada nas simulações é representada na Figura 5.15.

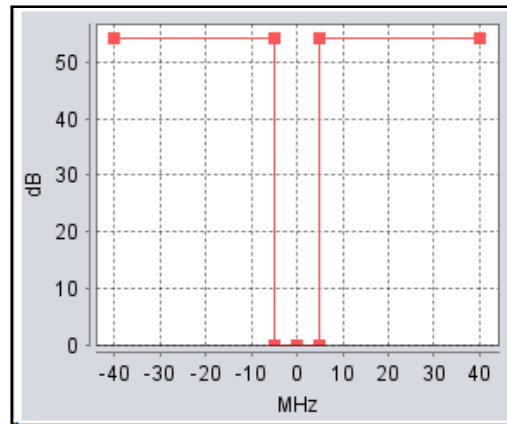


Figura 5.15: Máscara de ACS do LTE UL

Os demais parâmetros referentes ao sistema LTE UL foram os mesmos da análise anterior, indicados no Anexo D (Tabela D.2). A seguir serão apresentados os resultados das simulações.

No cenário simulado foram utilizadas 49 subportadoras por estação rádio-base e 7 subportadoras por usuário móvel. Isto corresponde a 21 usuários ativos na célula tri-setorizada ou 399 no *cluster* de 19 células, conforme Figura 5.16. Este número de usuários garantiu que a taxa de bit para um raio de célula de 2 km atingisse 3 Mbps sem interferência, que é um valor compatível com casos reais.

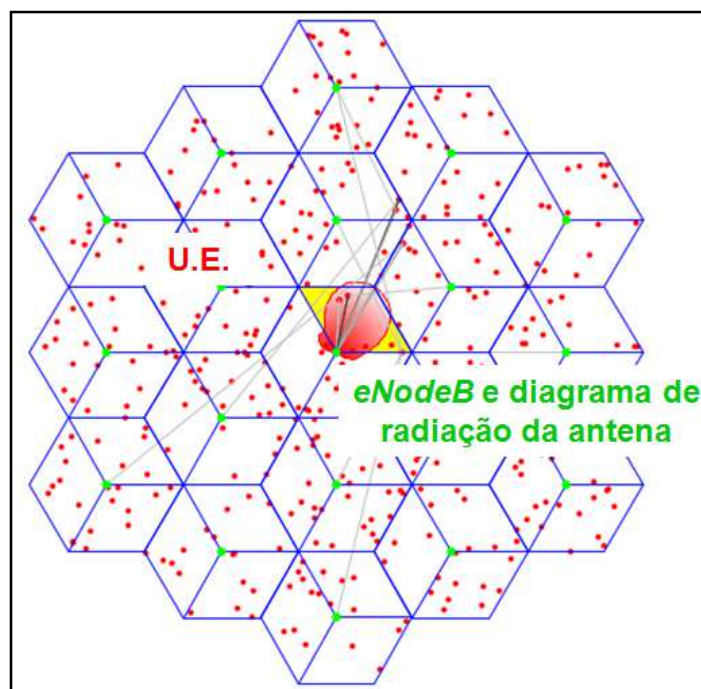


Figura 5.16: Estrutura da rede celular composta por 19 células tri-setorizadas com 21 usuários ativos

Os resultados serão apresentados em termos da taxa de bit, da capacidade do sistema, das perdas de capacidade, das perdas da taxa de bit e da razão SINR. Cada valor representa a média agregada sobre todos os usuários ativos do sistema.

A taxa de bit é calculada através da seguinte eq.[13]:

$$\text{Taxa de bit [kbps]} = \frac{\text{Nº de subportadoras/U.E.}}{\text{Nº total de subportadoras}} \times (X_{\text{bps/Hz}})_{\text{SINR}} \times BW[\text{MHz}] \times 1000, \quad (5.5)$$

onde os valores $(X_{\text{bps}})_{\text{SINR}}$ são obtidos a partir do gráfico da Figura 5.17, que mostra a relação entre a capacidade, definida pela eficiência espectral (bps/Hz), e a SINR calculada [57].

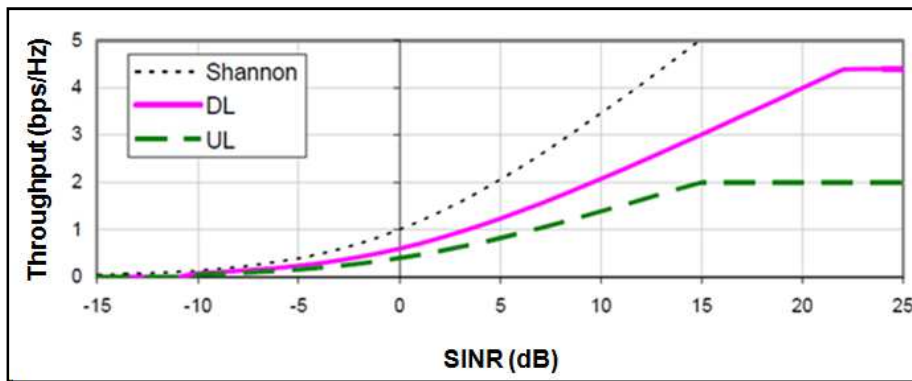


Figura 5.17: Capacidade do canal x SINR [57]

A taxa de bits corresponde ao tráfego de informação que flui pelas U.E. e a perda da taxa de bit é o percentual de redução em relação ao caso sem interferência. Este valor é calculado da seguinte forma [13]:

$$\text{Perda da taxa de bit [\%]} = 100 - \left[\left(\frac{\text{Taxa de bit com interferência}}{\text{Taxa de bit sem interferência}} \right) \times 100 \right]. \quad (5.6)$$

O critério usado para avaliar a taxa de bit suficiente que garanta um desempenho adequado do sistema foi baseado em [48]. Neste relatório, o parâmetro usado como referência para a análise em banda larga móvel (internet 3G e 4G) foi a taxa de sucesso de transferência de arquivos que deve ser maior ou igual a 70% de sessões de teste iniciadas e concluídas com sucesso, sem interrupções. Assim, este valor foi usado como referência. Para valores de perda

da taxa de bit maiores que 30%, o desempenho do sistema LTE será avaliado como insatisfatório.

A capacidade do sistema com interferência e sem interferência está relacionada com o número de usuários ativos que estão conectados na presença ou na ausência da interferência, respectivamente.

A perda da capacidade do sistema é calculada por:

$$\text{Perda da capacidade [\%]} = 100 - \left[\left(\frac{\text{Capacidade com interferência}}{\text{Capacidade sem interferência}} \right) \times 100 \right]. \quad (5.7)$$

O critério para avaliar o atendimento ao parâmetro de capacidade do sistema foi baseado em [23]. O valor de 5% de perda de capacidade foi estabelecido para avaliar o desempenho do sistema vítima. Para valores de perda de capacidade abaixo deste limiar, a capacidade do sistema é considerada como aceitável, do contrário, o desempenho está prejudicado.

(a) Cenário 1: Raio de cobertura da TV Digital de 10 km e raio da célula LTE variável

O SEAMCAT sugere a simulação de mais de 20 mil eventos como garantia de resultados confiáveis, entretanto, para este tipo de análise onde a vítima é o sistema LTE, o custo computacional é muito grande para este número, requerendo em torno de 5 horas por simulação para um computador com processador de 3 GHz e memória RAM de 24 GB. Assim, foram realizados testes para verificar a estabilidade dos resultados com o número de eventos simulados. Como mostra a Figura 5.18, observa-se estabilidade com um número bem mais baixo de eventos. Assim, decidiu-se utilizar 3 mil eventos para todos os cenários.

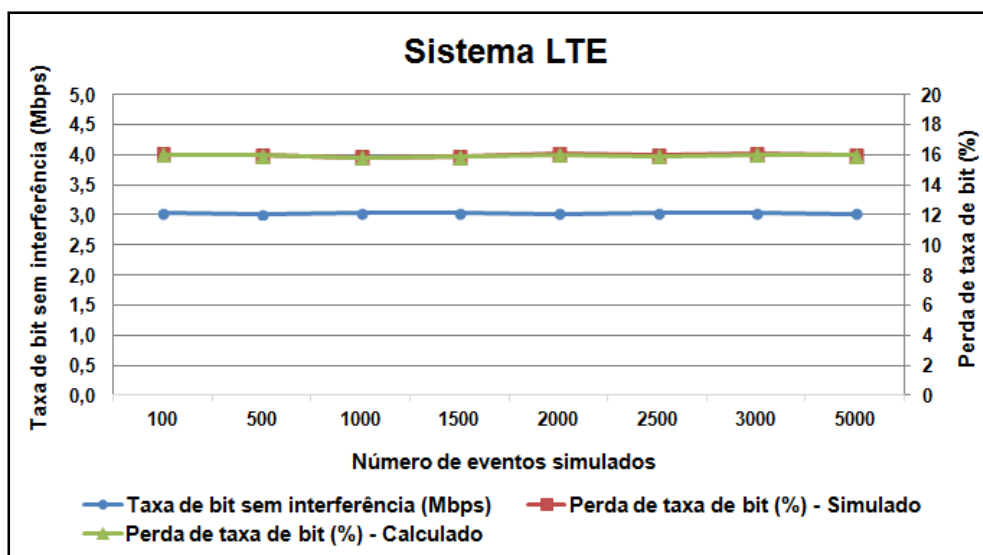


Figura 5.18: Teste para determinar o número de eventos simulados

O cenário simulado corresponde a uma rede celular localizada dentro da área de cobertura da TV, como mostra a Figuras 5.19. Foram considerados, em diferentes casos, raios de célula entre 500 m e 3 km.

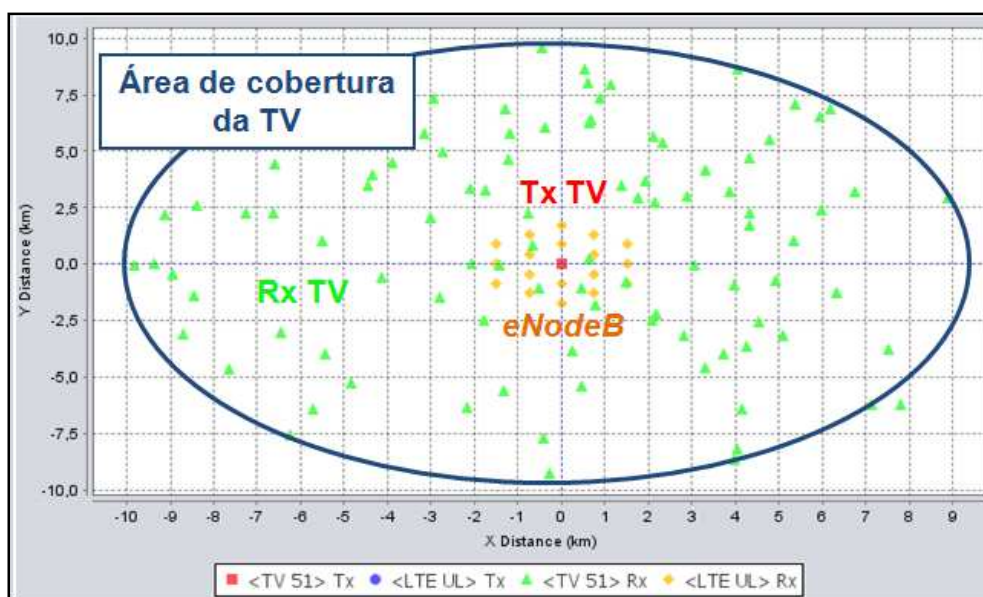


Figura 5.19: Teste para determinar o número de eventos simulados

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram os valores de taxa de bits calculados pelo SEAMCAT para os primeiros 1.000 eventos de simulações com e sem interferência.

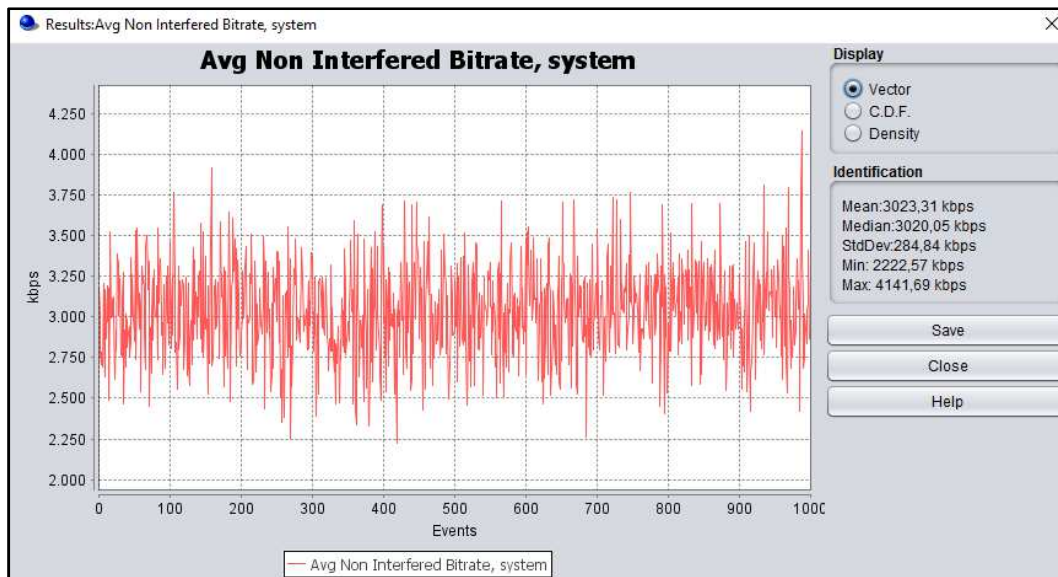


Figura 5.20: Resultado da taxa de bit sem interferência por evento

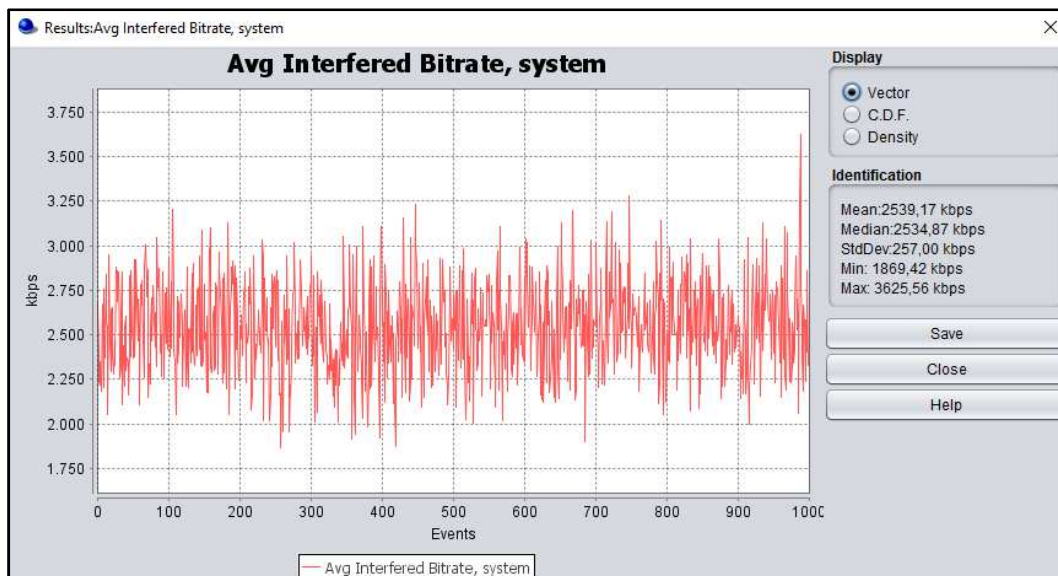


Figura 5.21: Resultado da taxa de bit com interferência por evento

Nos casos simulados, não houve usuários desconectados ou removidos da célula, pois todos atingiram o valor de SINR mínimo requerido. A Figura 5.22 mostra o número constante de usuários ativos nos 1.000 primeiros eventos de uma simulação com interferência.

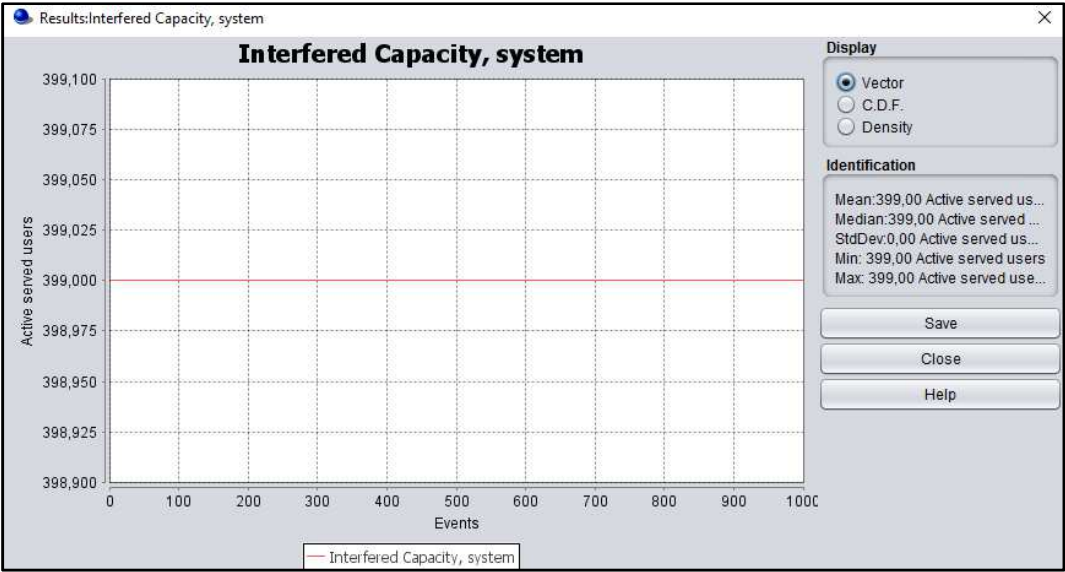


Figura 5.22: Resultado da capacidade do sistema com interferência: número de usuários ativos por evento

A Figura 5.23 mostra o valor de SINR médio por evento, para os primeiros 1.000 eventos de uma simulação com interferência. Na aba do lado direito do quadro, são apresentados os valores de média, mediana, desvio padrão e valores mínimo e máximo da SINR para todos os eventos simulados.

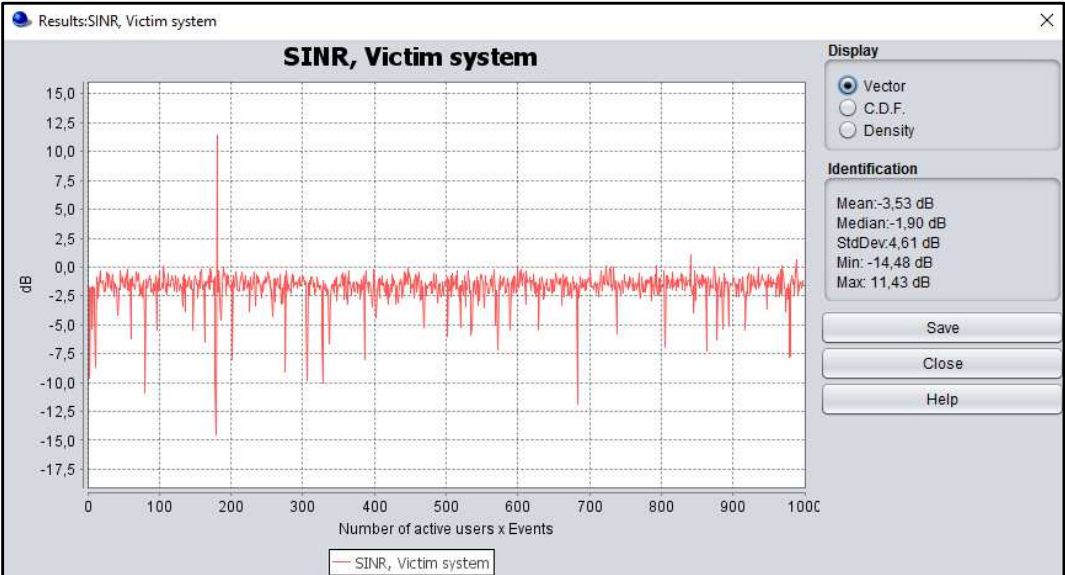


Figura 5.23: Resultado da razão SINR da vítima (eNodeB) por evento

As Tabelas 5.16 a 5.18 apresentam os resultados da simulação do efeito de interferência do transmissor de TV Digital no receptor-vítima do LTE UL

(*eNodeB*). Foram considerados valores da EIRP da TV de 60, 70 e 80 dBm e raios da célula de 500 m, 2 km e 3 km, caso a caso.

Para células com 0,5 km de raio, a taxa de bits média sem interferência foi, aproximadamente, igual a 12,98 Mbps. De acordo com a Tabela 5.16, com a presença de sinal interferente, a taxa de bits apresentou uma perda crescente que chegou a 28% para a potência máxima de 80 dBm do transmissor de TV. Os parâmetros obtidos estão em concordância com os limites estabelecidos.

Tabela 5.16: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *uplink* com raio da célula = 0,5 km [46]

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	12,10212	12,977	399	399	8,25	0 (OK)	6,745 (OK)
70 (E)*	10,98949	12,9709	399	399	6,74	0 (OK)	15,283 (OK)
80 (E)*	9,38267	12,98937	399	399	4,04	0 (OK)	27,776 (OK)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

Para um raio de célula de 2 km, os resultados mostrados na Tabela 5.17 indicam que as taxas de bits média caem cerca de 80%, para 3 Mbps, que ainda é uma boa taxa média, compatível com a velocidade de transmissão de sistemas comerciais atuais. Com a presença de interferência, a taxa de bits apresentou uma perda crescente que chega a 45% para a potência máxima de 80 dBm do transmissor de TV, ou seja, ultrapassou os 30% do valor de referência.

Tabela 5.17: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *uplink* com raio da célula = 2 km [46]

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	2,54	3,03	399	399	-3,52	0 (OK)	16,03 (OK)
70 (E)*	2,16	3,02	399	399	-5,8	0 (OK)	28,6 (OK)
80 (E)*	1,66	3,03	399	399	-9,46	0 (OK)	44,92 (> 30%)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

Os valores obtidos na Tabela 5.18 são referentes ao raio da célula de 3 km. A taxa de bit total alcançada foi de 0,91 Mbps. Novamente, com a presença de interferência, a taxa de bits apresentou uma perda crescente que chega a 40% para a potência máxima de 80 dBm do transmissor de TV. Neste caso, a taxa de bits média se aproxima do valor de taxa mínima de 0,5 Mbps considerada aceitável em sistemas atuais. Já a perda da taxa de bit ultrapassou os 30% do valor de referência.

Tabela 5.18: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *uplink* com raio da célula = 3 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	0,7913	0,91171	399	399	-8,7	0 (OK)	13,245 (OK)
70 (E)*	0,6821	0,91236	399	399	-10,39	0 (OK)	25,278 (OK)
80 (E)*	0,54246	0,91326	399	399	-13,37	0 (OK)	40,64 (> 30%)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

(b) Cenário 2: Raio de cobertura da TV Digital de 20 km e raio da célula LTE de 2 km

Neste cenário, o raio de cobertura da TV aumentou para 20 km e o raio da célula fixado em 2 km. Todas as demais configurações e parâmetros do Cenário 1 foram mantidos. Os resultados obtidos para este cenário, mostrados na Tabela 5.19, foram muito próximos aos do caso anterior, com raio de cobertura da TV de 10 km.

Tabela 5.19: Cenário 2: Valores médios obtidos no sistema LTE *uplink* com raio da célula = 2 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	2,55	3,028	399	399	-3,5	0 (OK)	15,85 (OK)
70 (E)*	2,16	3,018	399	399	-5,8	0 (OK)	28,593 (OK)
80 (E)*	1,66	3,03	399	399	-9,52	0 (OK)	45,14 (> 30%)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

5.2.2.

Interferência da TV Digital no *downlink* do sistema LTE

Nesta seção, são apresentados os resultados da interferência da TV, operando no canal 51, no LTE *downlink* que corresponde ao canal 63. As análises também foram realizadas para três valores de EIRP da TV, 60, 70 e 80 dBm e para os raios de cobertura de 10 e 20 km. Os parâmetros referentes ao sistema de TV Digital foram os mesmos das análises anteriores, indicados no Anexo D (Tabela D.1). Os parâmetros referentes ao sistema LTE DL também foram os mesmos das análises anteriores, indicados no Anexo D (Tabela D.3). A seguir os resultados serão apresentados.

Para o sistema OFDMA DL, o valor de SINR mínimo foi calculado através da equação da capacidade máxima teórica e pelo teorema de Shannon-Hartley. O valor calculado foi de 11,06 dB utilizando modulação 64-QAM 3/4.

As células tri-setorizadas permaneceram com 21 usuários ativos, pois a taxa de bit média sem interferência atingiu o valor de 4 Mbps para um raio de célula de 2 km, o que é um valor adequado. O valor de ACS foi de 49 dB, calculado a partir da razão de proteção, parâmetro medido pela Mackenzie [36].

(a) Cenário 1: Raio de cobertura da TV Digital de 10 km e raio da célula LTE variável

Para determinar o número necessário de eventos simulados, testes foram realizados até que o simulador atingisse a estabilidade, conforme mostra a Figura 5.24. O número usado também foi de 3 mil eventos para todos os cenários.

O cenário foi formado com uma rede celular cujo raio foi variado de 500 m a 5 km, localizada dentro da área de cobertura da TV, como mostra a Figura 5.25. A técnica de *wrap-around* também foi usada. O sistema interferente é o transmissor de sinal de TV Digital. No sentido de *downlink* a vítima é o U.E., que não está representado na Figura 5.25.

Os resultados são apresentados em termos dos valores médios da taxa de bit, da capacidade do sistema, das perdas de capacidade, das perdas da taxa de bit e da razão SINR nos U.E.'s.

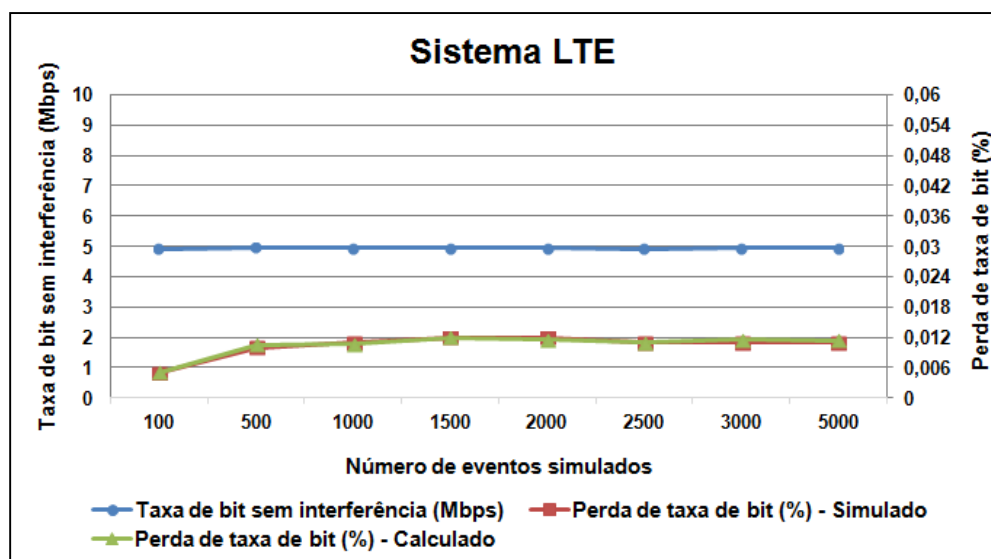


Figura 5.24: Teste para determinar o número de eventos simulados

As quatro operadoras 4G avaliadas em [48] oferecem em contrato para seus clientes uma taxa de 5 Mbps de *download*. O valor real não deve ser menor que 70% da vazão nominal anunciada ao consumidor em contrato. Assim, este valor foi usado como referência para avaliar a taxa de bit. Considerou-se que as perdas de capacidade e da taxa de bit em presença de interferência devem ser menores que 5% e 30%, respectivamente, em relação aos valores sem interferência.

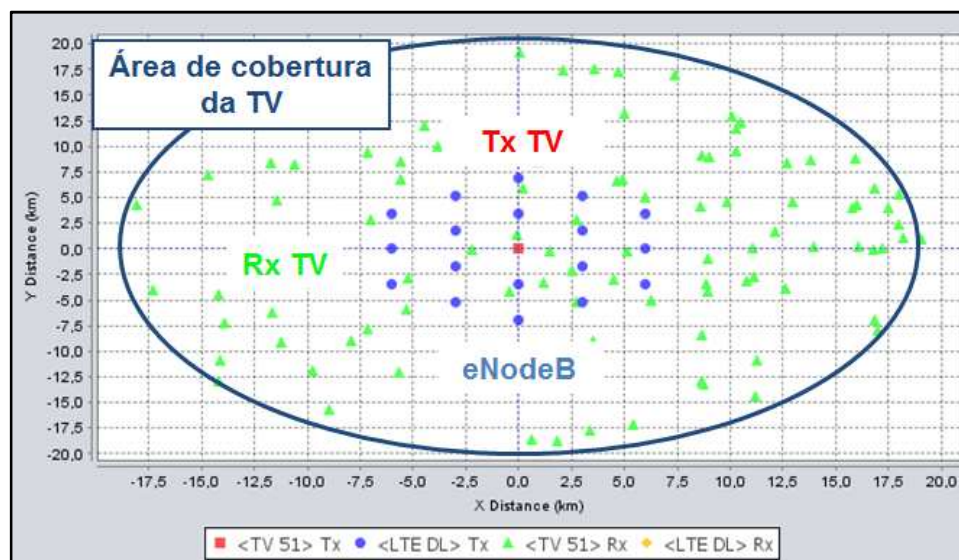


Figura 5.25: Cenário de interferência com raio de cobertura de TV de 20 km e raio da célula LTE de 2 km

De acordo com a Tabela 5.20, para um raio de célula de 500 m, a taxa de bit média tanto na ausência como na presença de interferência foi ligeiramente

superior a 4,9 Mbps para todos os valores de EIRP. Os valores de perda de capacidade e de perda da taxa de bit foram praticamente nulos. Todos os parâmetros atenderam aos requisitos propostos.

Tabela 5.20: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *downlink* com raio da célula = 0,5 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	4,94434	4,934435	59,22	59,22	2,56	0 (OK)	0 (OK)
70 (E)*	4,93245	4,9326	59,06	59,06	2,56	0,003 (OK)	0,003 (OK)
80 (E)*	4,94858	4,95032	59,24	59,26	2,56	0,035 (OK)	0,035 (OK)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

Na Tabela 5.21, os mesmos parâmetros são apresentados para um raio de célula de 2 km. Não se observam mudanças significativas em relação ao caso anterior, podendo as variações mínimas ser creditadas ao processo de simulação. O valor de SINR também se manteve constante para os diferentes valores de EIRP. Os valores de perda de capacidade e de perda da taxa de bit foram praticamente nulos pela mesma razão do cenário anterior. Também neste caso, todos os parâmetros atenderam aos requisitos propostos.

Tabela 5.21: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *downlink* com raio da célula = 2 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	4,93507	4,93564	58,25	58,25	2,62	0,011 (OK)	0,011 (OK)
70 (E)*	4,93985	4,94416	58,34	58,34	2,62	0,078 (OK)	0,081 (OK)
80 (E)*	4,90324	4,9365	57,87	58,26	2,6	0,667 (OK)	0,678 (OK)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

Os valores mostrados na Tabela 5.22 são referentes ao raio da célula de 3 km. A taxa média de bit tanto na ausência como na presença da interferência ficou em torno de 4,64 Mbps, um pequeno decréscimo em relação aos casos anteriores. O valor de SINR foi o mesmo para os diferentes valores de EIRP. Os valores de

perda de capacidade e de perda da taxa de bit aumentaram com a EIRP, mas continuaram muito pequenos, abaixo de 1%. Novamente, todos os parâmetros atenderam aos requisitos propostos.

Tabela 5.22: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *downlink* com raio da célula = 3 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	4,62741	4,6282	54,62	54,63	2,45	0,016 (OK)	0,017 (OK)
70 (E)*	4,62862	4,63429	54,61	54,67	2,45	0,113 (OK)	0,124 (OK)
80 (E)*	4,61516	4,65515	54,45	54,92	2,45	0,852 (OK)	0,859 (OK)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

Os valores mostrados na Tabela 5.23 são referentes ao raio da célula de 5 km. A taxa média de bit tanto na ausência como na presença da interferência ficou em torno de 3,6 Mbps, significativamente menor do que nos casos anteriores. O valor de SINR manteve-se o mesmo para os diferentes valores de EIRP. Os valores de perda de capacidade e de perda da taxa de bit aumentaram com os valores de EIRP, mas permaneceram abaixo de 1%. Também neste cenário todos os parâmetros atenderam aos requisitos propostos.

Tabela 5.23: Cenário 1: Valores médios obtidos no sistema LTE *downlink* com raio da célula = 5 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	3,6255	3,62616	42,93	42,94	1,92	0,018 (OK)	0,018 (OK)
70 (E)*	3,6134	3,61811	42,75	42,8	1,92	0,127 (OK)	0,133 (OK)
80 (E)*	3,57716	3,60586	42,35	42,69	1,9	0,781 (OK)	0,804 (OK)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

(b) Cenário 2: Raio de cobertura da TV Digital de 20 km e raio da célula LTE de 2 km

Neste cenário, o raio de cobertura da TV aumentou para 20 km e o raio da célula fixado em 2 km. Todas as demais configurações e parâmetros do Cenário 1 foram mantidos. Os resultados obtidos para este cenário, mostrados na Tabela

5.24, foram muito próximos aos do caso anterior com raio de cobertura da TV de 10 km.

Tabela 5.24: Cenário 2: Valores médios obtidos no sistema LTE *downlink* com raio da célula = 2 km

EIRP TV	Taxa de bit com interf.	Taxa de bit sem interf.	Capacidade com interf.	Capacidade sem interf.	SINR	Perda de capacidade	Perda de taxa de bit
dBm	Mbps	Mbps	Usuários ativos	Usuários ativos	dB	%	%
60 (A)*	4,94086	4,9415	58,3	58,31	2,62	0,013 (OK)	0,013 (OK)
70 (E)*	4,91623	4,92061	57,96	58,01	2,61	0,083 (OK)	0,09 (OK)
80 (E)*	4,89442	4,92757	57,85	58,23	2,59	0,659 (OK)	0,676 (OK)

* (A) - Classe A, (E) - Classe Especial

A comparação dos resultados dos efeitos da interferência da TV Digital sobre o LTE mostra que a interferência da TV Digital no LTE UL é mais séria do que no LTE DL. Ainda assim mostram que a coexistência dos sistemas operando em canais adjacentes é possível.

O SEAMCAT também pode exibir outros tipos de gráficos, como, função de distribuição cumulativa e função densidade de probabilidade, que se encontram no Anexo E.

6

Estudo de caso

6.1.

Descrição do cenário

Para avaliar a interferência do sistema LTE nos receptores de TV Digital em um cenário real, a zona sul do município do Rio de Janeiro foi escolhida. O cenário de análise é composto por 56 ERB's distribuídas em 15 bairros no município do Rio de Janeiro, como mostra a Figura 6.1, e por um transmissor de sinal de TV localizado no morro do Sumaré. Ali estão localizadas as torres das emissoras de TV e estações de rádio da cidade, a uma altura de 741 m.

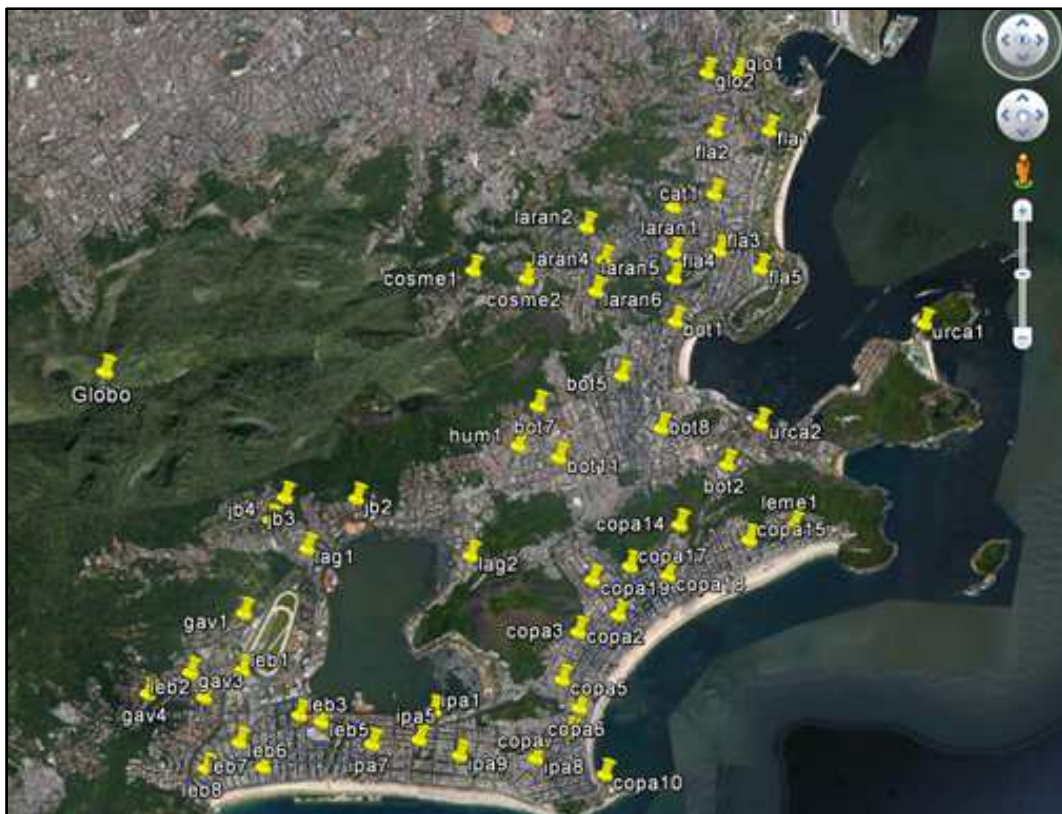


Figura 6.1: Transmissores de sinal LTE posicionados na zona sul do município do Rio de Janeiro

6.1.1. Disposição dos sistemas LTE e TV Digital

Primeiramente, as posições das estações móveis da operadora que vai utilizar a faixa adjacente ao canal 51 foram obtidas por meio do sistema Stel (Sistema de Serviços de Telecomunicações) da Anatel [58]. O sistema Stel gera relatórios com informações de frequência de transmissão e recepção da operadora celular escolhida, potência máxima de operação do equipamento, ganho máximo da antena, ângulo de elevação, azimuth, tipo de polarização, altura da antena, latitude e longitude, endereço de localização, entre outros. As operadoras de telefonia móvel ainda não ocuparam a faixa de 700 MHz, pois os canais de TV analógica ainda não foram desligados. Assim, foram coletadas as posições das estações móveis na faixa de 2650 MHz como referência.

Da mesma forma, considerou-se o posicionamento real de uma emissora de TV Digital como referência. O relatório de descrição deste sistema de transmissão foi obtido através do sistema SRD (Sistema de Controle de Radiodifusão) da Anatel [59]. Este sistema fornece dados do canal ocupado, faixa de frequência, endereço da localidade, latitude e longitude, cota da base do terreno (cvt), modelo e fabricante do transmissor e da antena, potência máxima de operação do transmissor, ganho máximo da antena, polarização, altura do centro de irradiação do sistema (HCI), inclinação de feixe, dados da linha de transmissão, ERP máxima, entre outros.

A disposição dos elementos vítima e interferente no SEAMCAT pode ser vista na Figura 6.2. Os U.E.'s estão a 1 m de distância dos receptores de TV Digital (vítima), considerado o pior caso em que o usuário móvel está sentado na frente da TV. A vítima sofre interferência do LTE *downlink* e do *uplink*. Os pares de receptores-vítima e interferentes foram distribuídos aleatoriamente na área de cobertura da TV de 10 km.

Para criar uma situação de pior caso, a frequência escolhida para o sistema vítima não corresponde à atual frequência de operação da TV considerada, que é 563 MHz (canal 29). Como nas análises anteriores, o canal que sofrerá maior interferência é o 51 (695 MHz), pois é o adjacente mais próximo do sistema LTE. Então, este foi o canal considerado na avaliação de interferência.

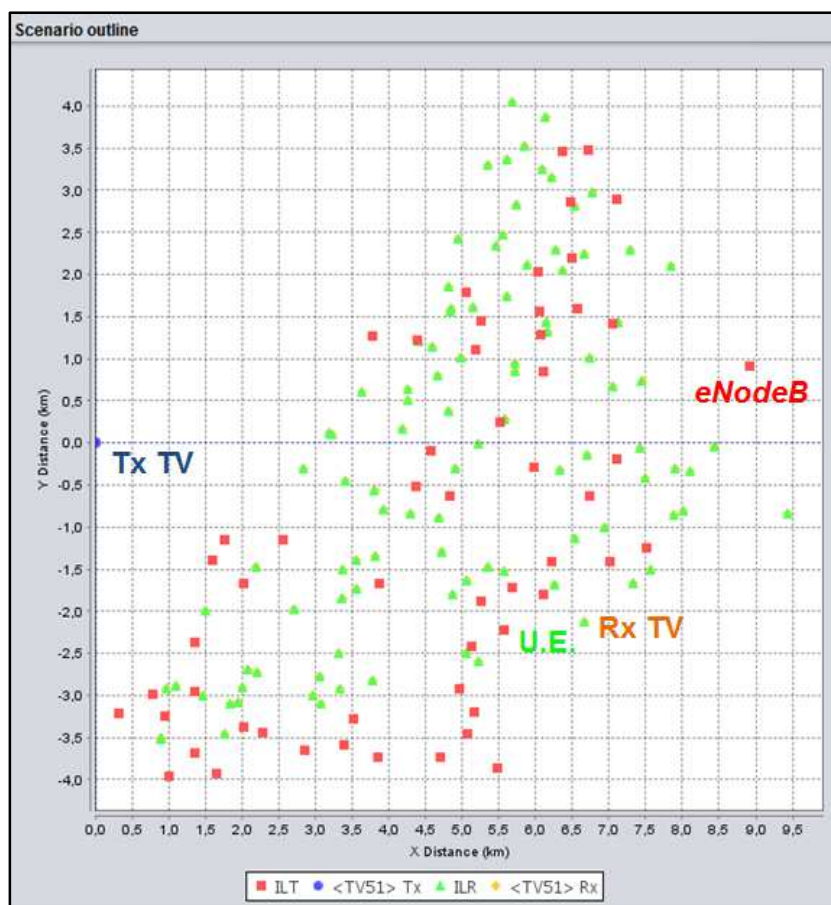


Figura 6.2: Cenário de simulação de interferência na zona sul do município do Rio de Janeiro

6.1.2. Potência do transmissor de TV

O valor de ERP máxima do sistema de TV, localizado no Sumaré, foi calculado pela ferramenta SIGAnatel (Sistema de Informações Geográficas do Brasil) disponível na página oficial da Anatel [60], conforme Figura 6.3. A ferramenta recebe dados de entrada, tais como o canal a ser analisado, ERP referente ao Plano Básico, coordenadas geográficas, ganho máximo da antena, perdas, atenuações, e em seguida calcula a ERP máxima considerando a elevação do terreno.

A Tabela 5.15 indica os valores máximos de potência ERP em função da frequência do canal, para a faixa de UHF, correspondente a cada classe de estação, a altura do nível médio do terreno (HNMT) e as respectivas distâncias máximas ao contorno protegido [60]. Este cenário exigiu valores de ERP maiores que os valores tabelados devido ao ponto elevado em que a antena de televisão

está instalada, que está a 741 m (cbt, valor obtido pelo SIGAnatel), a 150 m de altura na torre, resultando em 891 m, valor utilizado como parâmetro de entrada no Seamcat.

A Resolução 284 [21] informa que podem ser propostos valores de ERP superiores às especificadas na Tabela 5.15, desde que a distância máxima ao contorno protegido não seja ultrapassada em qualquer direção. Os canais digitais são protegidos contra interferências prejudiciais dentro da área delimitada pelo seu contorno protegido. O contorno protegido corresponde ao lugar geométrico dos pontos onde a intensidade de campo de seu sinal tem valor de 51 dBμ para a faixa de frequência UHF.

Segundo a Resolução 284, o nível médio do terreno (NMT) deve ser obtido no mínimo em 12 radiais, a partir do ponto de transmissão, com espaçamento angular de 30° entre si, incluindo a direção do Norte Verdadeiro. A média aritmética das altitudes do terreno em relação ao nível do mar para cada radial será calculada, considerando trechos compreendidos entre 3 km e 15 km a partir do local da antena. As cotas de, no mínimo 50 pontos, devem ser calculadas para cada radial [21].

O valor de ERP máxima (Classe Especial) de Plano Básico é de 100 kW a uma altura de 150 m acima do nível médio da radial, conforme Tabela 5.15. No cenário de simulação da zona sul do Rio de Janeiro, onde a antena está a uma altura de 891 m do solo, houve a necessidade de aumentar o valor de ERP do Plano Básico, para buscar a convivência entre ambos sistemas. Assim, foi considerado o valor de ERP (Plano Básico) de 1 MW para uma análise inicial.

Na Figura 6.3 é possível observar que um valor de ERP do Plano Básico de 1 MW corresponde à potência de transmissão de 0,27 kW para cota da base do terreno de 741 m. Este valor de potência respeitou a distância máxima ao contorno protegido para cada radial. Assim, a ERP máxima calculada é de 2,011 kW ou 63 dBm.

Em uma segunda análise, foi utilizado valor de ERP (Plano Básico) obtido de consulta ao SISCOM (Sistema de Informação dos Serviços de Comunicação de Massa) da Anatel [61], para um transmissor de TV localizado no morro do Sumaré. Este valor máximo é de 10 MW. Utilizando a ferramenta SIGAnatel, o

valor de ERP máxima encontrado foi de 42,049 kW ou 76,2 dBm. Os valores de ERP TV de 63 dBm e 76,2 dBm foram usados como parâmetros de entrada para o Seamcat.

Os diagramas de radiação das antenas de transmissão e recepção do sinal de TV Digital são os mesmos usados nas simulações anteriores e podem ser vistos no Anexo E (Tabela I).

Análise Técnica - TV/FM

Analogico/Digital: ☐ Analógico ☒ Digital Serviço: **TV**

Curva: ☒ UIT - 1546 ☐ FCC Canal: **51**

ERP de Plano Básico (kW): **1000**

Latitude: **22° 57' 05" 00 S** Longitude: **43° 14' 14" 00 W**

HCl: (m) **97** Pot. TX (kW): **0.27**

G máx SI (dBd): **9.8** Comp. Linha - L (m): **108**

Demais Perdas (dB): **0** Atenuação (dB/100m): **1**

Município: **Rio de Janeiro - RJ** Cbt (m): **741**

Eficiência: **0,780** Erp máx (kW): **2,011**

Campo Protegido (dBμV/m): **51,000** Intervalo Radiais: **30**

Gerar **Exportar**

Azimute	NMT	HNMT	E/Emax	(E/Emax) ²	ERPaz(kW)	ERP150m(kW)	C.Prot(km)	C1(km)	C2(km)	C3(km)	Legenda
0	13	825	1	1,000	2,011	727,670	72,735				0%-80%
30	5	833	1	1,000	2,011	759,690	73,105				0%-80%
60	42	796	1	1,000	2,011	621,048	71,389				0%-80%
90	36	802	1	1,000	2,011	641,941	71,668				0%-80%
120	16	822	1	1,000	2,011	715,963	72,596				0%-80%
150	1	837	1	1,000	2,011	776,145	73,290				0%-80%
180	23	815	1	1,000	2,011	689,269	72,271				0%-80%
210	71	767	1	1,000	2,011	528,018	70,036				0%-80%
240	145	693	1	1,000	2,011	334,899	66,374				0%-80%
270	292	546	1	1,000	2,011	129,638	59,286				0%-80%
300	213	625	1	1,000	2,011	212,564	62,892				0%-80%
330	37	801	1	1,000	2,011	638,418	71,621				0%-80%

Legenda: 0%-80% 80%-100% >100%

Figura 6.3: Tela do SIGAnatel [60]

6.1.3. Filtros dos receptores de TV

Na recepção do sistema vítima, é possível escolher entre duas opções de atenuação dos efeitos de interferência: curva de atenuação do filtro de recepção ou curva ACS. Em cada análise escolhe-se por uma dessas curvas, que é inserida como máscara de bloqueio do receptor-vítima no Seamcat. O filtro considerado

foi protótipo *Proeletronic* (Anexo E – Tabela I) apresentado no capítulo 5. Quanto à curva de ACS, foi utilizada a curva de um dos receptores testados pela Universidade Mackenzie.

Em 2013, a Universidade Mackenzie [8] realizou testes em laboratório para avaliar o desempenho de 6 receptores comerciais na presença de interferência de sinais LTE DL e LTE UL na entrada da antena receptora de TV Digital. Esta avaliação consistiu na obtenção da razão de proteção (PR – *Protection Ratio*) para cada receptor a partir das medidas de TOV. A PR foi medida em função da frequência de *offset* entre os sinais desejado e interferente. Todos os receptores operaram até o seu limiar de recepção, de -77 dBm. O receptor que apresentou os piores valores de PR foi escolhido para a simulação, neste caso, o Receptor E (Figura 6.4).

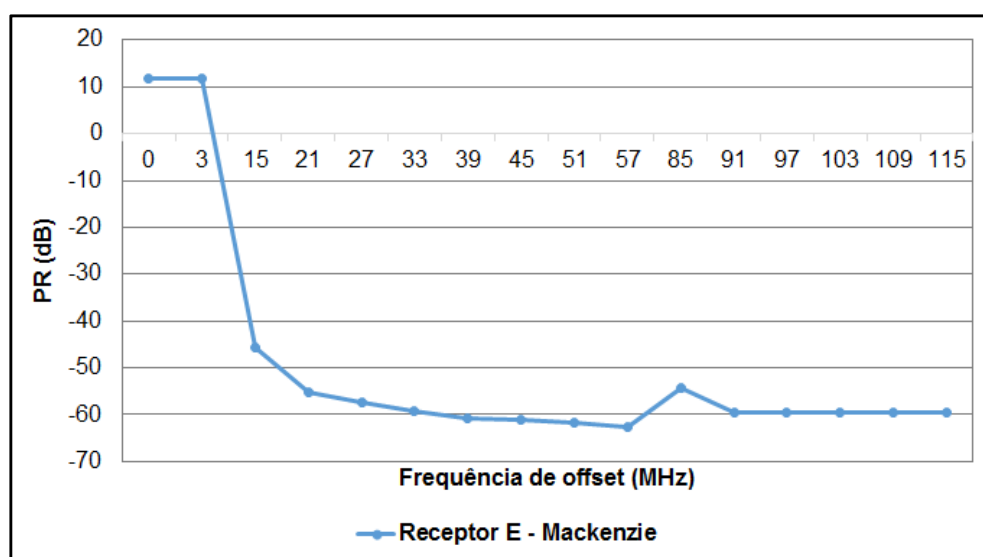


Figura 6.4: Razão de proteção em função da frequência offset obtida pela Universidade Mackenzie [8]

Os valores de ACS foram obtidos a partir da eq. (5.4). Além dos valores da razão de proteção na frequência de *offset* (Figura 6.4), foram considerados também, a razão de proteção co-canal e valores de ACLR do LTE sobre os canais de TV, medidos pela Universidade Mackenzie. Estes valores são apresentados na Tabela 6.1. Assim, é possível calcular os valores de seletividade do receptor de TV Digital para canal adjacente (ACS). Estes valores estão representados por uma

curva na Figura 6.5. Os outros parâmetros de configuração do sistema de TV Digital podem ser vistos na Tabela 6.2.

Tabela 6.1: Razão de proteção co-canal e valores de ACLR do LTE medidos pela Universidade Mackenzie [8] [36]

Parâmetros medidos	Canal de TV	LTE UL	LTE DL
Razão de proteção co-canal (dB)		13,5	12,5
ACLR (dB)	51	97,46	100,08
	50	102,64	100,74
	49	103,04	100,73
	Abaixo de 49	103,04	100,73

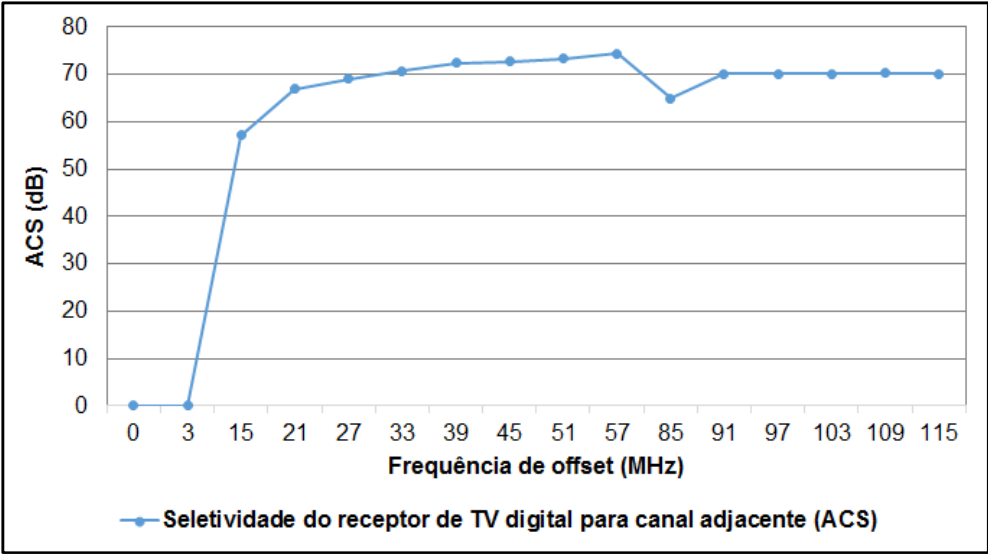


Figura 6.5: Curva de ACS calculada [8]

Tabela 6.2: Parâmetros de entrada do sistema de TV Digital no Seamcat

Frequência central	695,142857 MHz (Canal 51)
Altura da antena receptora	1,5 m
Ganho da antena receptora omni	2,15 dBi
Piso de ruído	-96,42 dBm
Sensibilidade de recepção	-77,42 dBm
Banda de recepção	5,7 MHz
Raio de cobertura	10 km
Modelo de propagação	ITU-R P. 1546-4 <i>land</i> , cenário urbano
Desvio padrão	5,5 dB

6.1.4. Parâmetros do sistema LTE

Os parâmetros de configuração do sistema interferente LTE são apresentados nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3: Parâmetros do sistema interferente LTE *uplink*

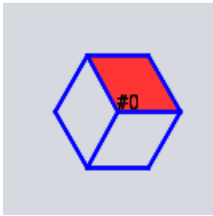
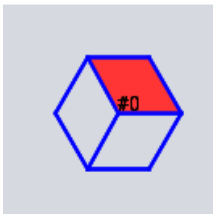
Frequência	713 MHz
SINR mínimo	6,76 dB
Largura de banda	10 MHz
Figura de ruído	9 dB
Largura de banda do <i>Resource Block</i> (RB)	180 MHz
Potência de transmissão	23 dBm
Usuários por BS	21
Modelo de propagação do enlace LTE	<i>Extended Hata</i> , cenário urbano
Layout da célula	
Raio da célula	0,25 km
Altura da antena	1 m
Modelo de propagação entre U.E. e receptor- vítima	<i>Extended Hata</i> - SRD, cenário urbano

Tabela 6.4: Parâmetros do sistema interferente LTE *downlink*

Frequência	768 MHz
Largura de banda	10 MHz
Potência de transmissão	46 dBm
Número de BS's no sistema	56
Layout da célula	
Raio da célula	2 km
Altura da antena	Variável de acordo com os dados do sistema STEL da Anatel [1]
Ganho da antena transmissora	14 dBi
Modelo de propagação entre <i>eNodeB</i> e receptor- vítima	<i>Extended Hata</i>

6.2.

Resultados da simulação da interferência do sistema LTE na TV Digital na zona sul do Rio de Janeiro

Nesta são apresentados quatro conjuntos de resultados, com objetivo de propor parâmetros que permitam a convivência entre os sistemas LTE e TV Digital em um cenário real. A condição usada para permitir o convívio é limitar a IP total em 5%, com o maior número possível de usuários ativos na célula.

6.2.1.

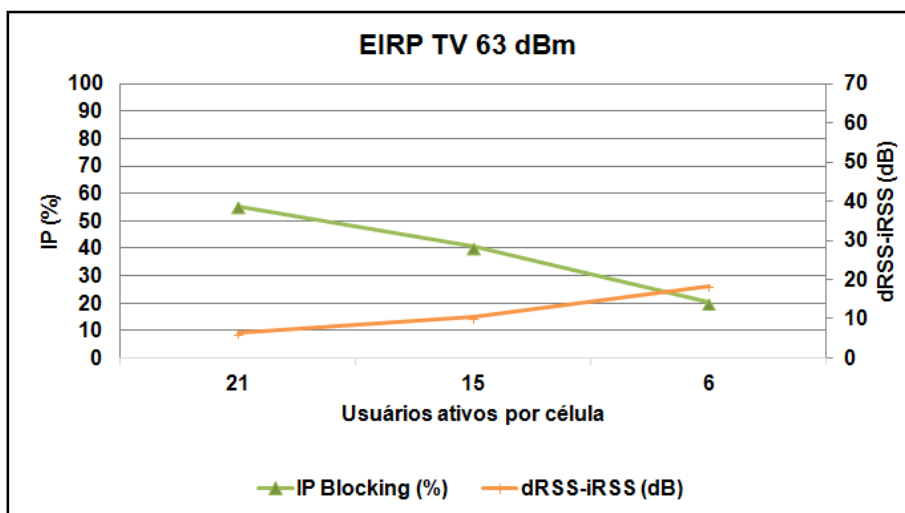
Caso I

Os parâmetros de entrada para a primeira análise de interferência são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Parâmetros de entrada do Caso I

EIRP TV	63 dBm
Ângulo de elevação da antena transmissora de TV	0°
Máscara de bloqueio do receptor-vítima	Filtro-protótipo da <i>Proeletronic</i>

Os resultados obtidos para este caso podem ser vistos nas Figuras 6.6 a 6.8. Na Figura 6.6, o *IP blocking* cai com o aumento da razão *dRSS/iRSS*, como esperado. Com 21 usuários ativos na célula a *IP blocking* alcançou o valor de 55,2% para uma razão *dRSS/iRSS* igual a 9,8 dB. Reduzindo o número de usuários até 6, obteve-se um valor de *IP blocking* de 20% para uma razão *dRSS/iRSS* de 18,4 dB. Ao reduzir o número de usuários ativos LTE, o número máximo de subportadoras disponíveis para cada BS foi respeitado. Este valor está bem acima do limiar estabelecido de 5%.

Figura 6.6: Caso I: Resultados da probabilidade de bloqueio (*blocking*) e da razão C/I

Por outro lado, na Figura 6.7 é possível observar que a probabilidade de eventos válidos (em que a média do sinal desejado da TV é maior que a sensibilidade de recepção) ficou em torno de, apenas, 25%. Isto significa que o cenário é pouco realista, já que 75% dos usuários precisariam de antenas externas mesmo na ausência de nos três valores de usuários ativos por célula (21, 15 e 6), e não foi suficiente para manter um valor de IP total menor que 5%.

Na Figura 6.8, os modos de interferência *unwanted*, *blocking* e a combinação de ambos são apresentados. Como observado nos cenários idealizados, apresentados no capítulo 5, a interferência dominante é a de *blocking*, devido à baixa seletividade do filtro-protótipo do receptor de TV.

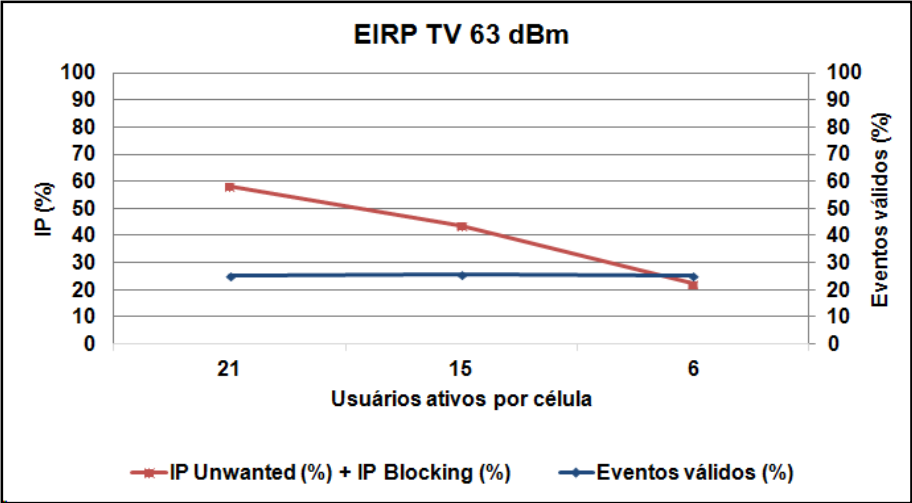


Figura 6.7: Caso I: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (*blocking*) e indesejada (*unwanted*) e da probabilidade de eventos válidos

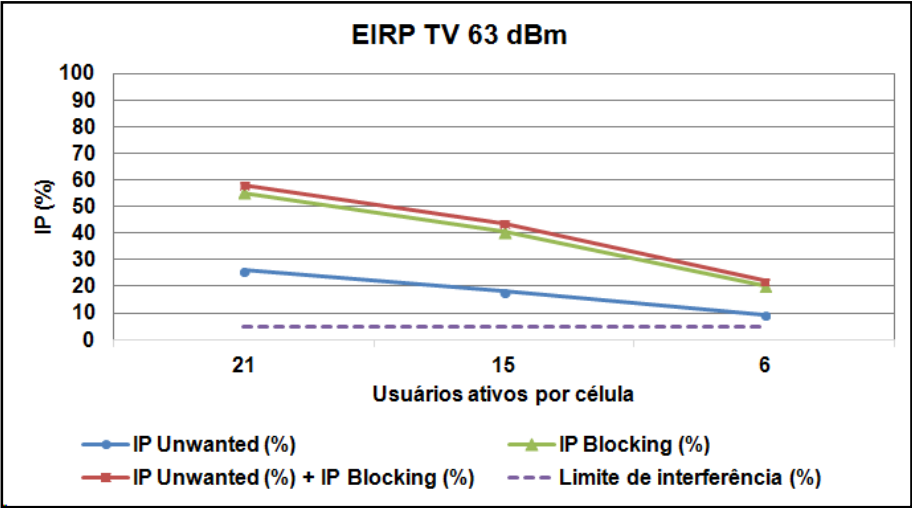


Figura 6.8: Caso I: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência

6.2.2.
Caso II

A partir da conclusão de que o cenário representado no caso I é pouco realista, foi introduzido um ângulo de elevação negativo (*down tilt*) na antena de transmissão de TV para melhorar o nível de sinal desejado nos receptores-vítima.

A EIRP da TV e o uso do filtro da *Proeletronic* foram mantidos na simulação. Os parâmetros de entrada da segunda análise de interferência são mostrados na Tabela 6.6. Os resultados da simulação podem ser vistos nas Figuras 6.9 a 6.11.

Tabela 6.6: Parâmetros de entrada do Caso II

EIRP TV	63 dBm
Ângulo de elevação da antena transmissora de TV	-5°
Máscara de bloqueio do receptor-vítima	Filtro-protótipo da <i>Proeletronic</i>

Na Figura 6.9 é possível perceber a redução do IP *blocking* e o aumento da razão dRSS/iRSS em relação ao caso I. O valor de IP *blocking* com 21 usuários ativos foi de 38,7% caindo para 12,5% com 6 usuários ativos.

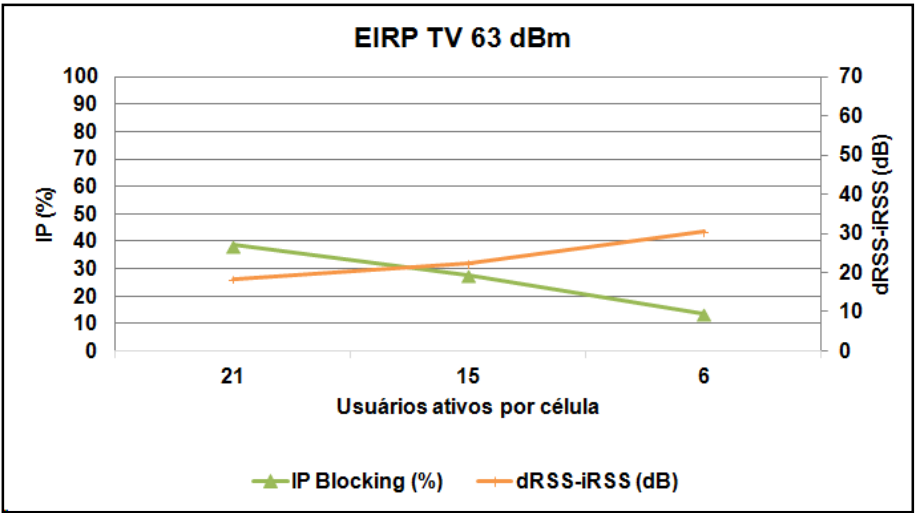


Figura 6.9: Caso II: Resultados da probabilidade de bloqueio (*blocking*) e da razão C/I

Na Figura 6.10, é possível observar que a probabilidade de eventos válidos ficou próxima de 80%, indicando um cenário viável. O valor de IP total continuou, entretanto, bem acima do limiar de 5%. Os resultados apresentados na Figura 6.11 mostram que, mais uma vez, a interferência dominante é o *blocking*, ou seja, a seletividade do receptor de TV continua a ser o maior problema.

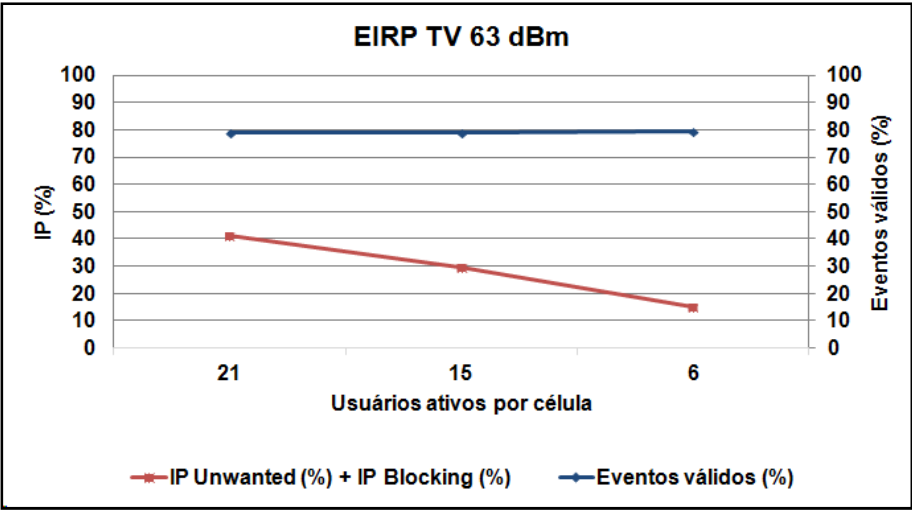


Figura 6.10: Caso II: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (*blocking*) e indesejada (*unwanted*) e da probabilidade de eventos válidos

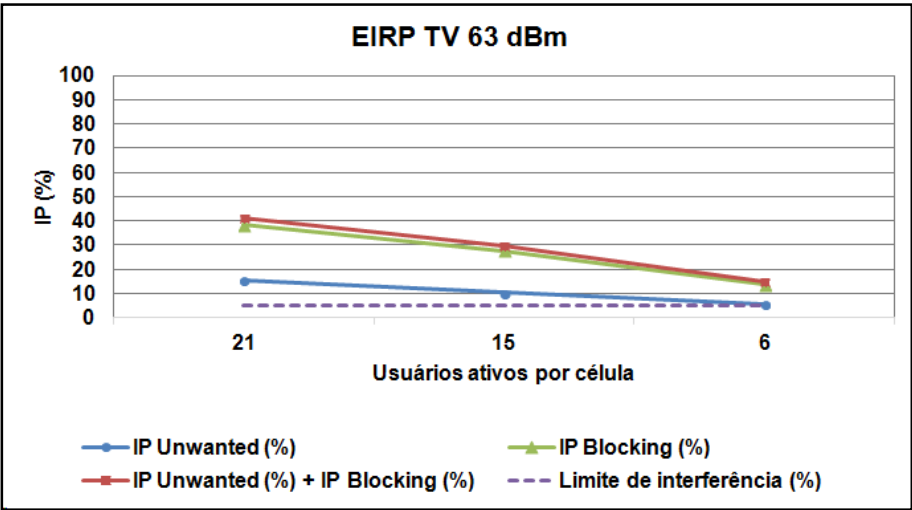


Figura 6.11: Caso II: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência

6.2.3. Caso III

No Caso III, para melhorar o nível do sinal desejado no receptor-vítima, aumentou-se a EIRP da TV para 76,24 dBm e o ângulo de elevação de -5° da antena transmissora de TV foi mantido. Os parâmetros de entrada para esta terceira simulação de interferência são apresentados na Tabela 6.7. Os resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras 6.12 a 6.14.

Tabela 6.7: Parâmetros de entrada do Caso III

EIRP TV	76,2 dBm
Ângulo de elevação da antena transmissora de TV	-5°
Máscara de bloqueio do receptor-vítima	Filtro-protótipo da <i>Proeletronic</i>

Na Figura 6.12, é possível perceber a redução do IP *blocking* e o aumento da razão dRSS/iRSS para os três valores de usuários ativos, em relação aos Casos I e II. O valor de IP *blocking* com 21 usuários ativos foi de 14,9%. Com 6 usuários ativos IP *blocking* cai a um valor próximo do limiar de 5%, com uma razão dRSS/iRSS de 43,6 dB.

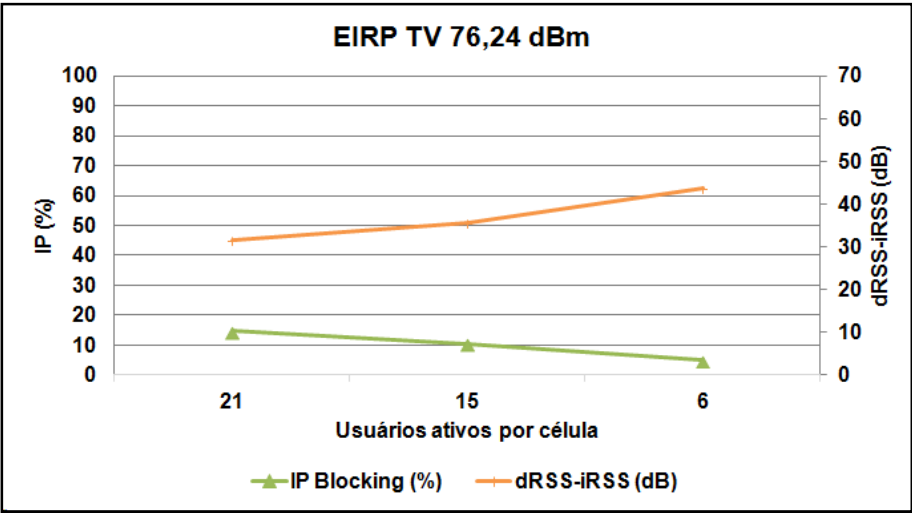


Figura 6.12: Caso III: Resultados da probabilidade de bloqueio (*blocking*) e da razão C/I

Na Figura 6.13, é possível observar que a probabilidade de eventos válidos ficou em torno de 97,3%.

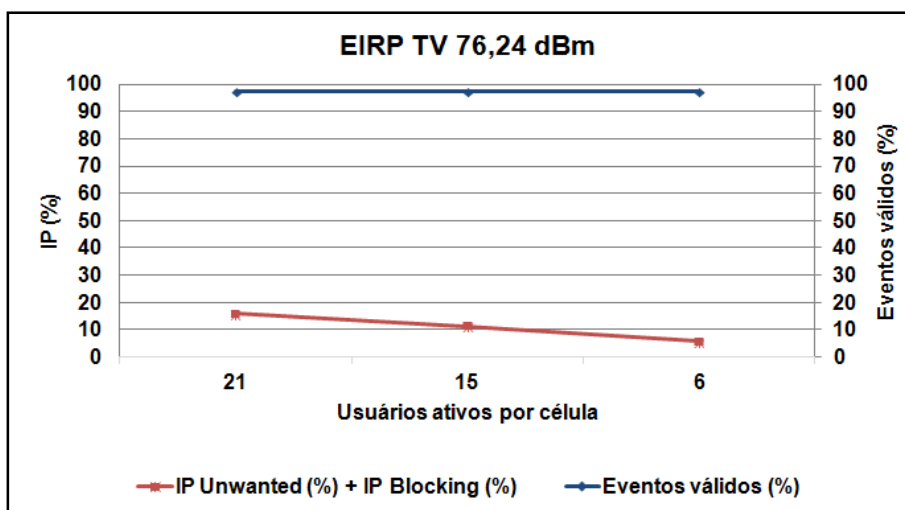


Figura 6.13: Caso III: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (*blocking*) e indesejada (*unwanted*) e da probabilidade de eventos válidos

Os resultados apresentados na Figura 6.14 mostram que a interferência dominante também é a de *blocking*. Com 6 usuários ativos em cada célula a IP total foi de 5,6%, valor muito próximo do limiar estabelecido.

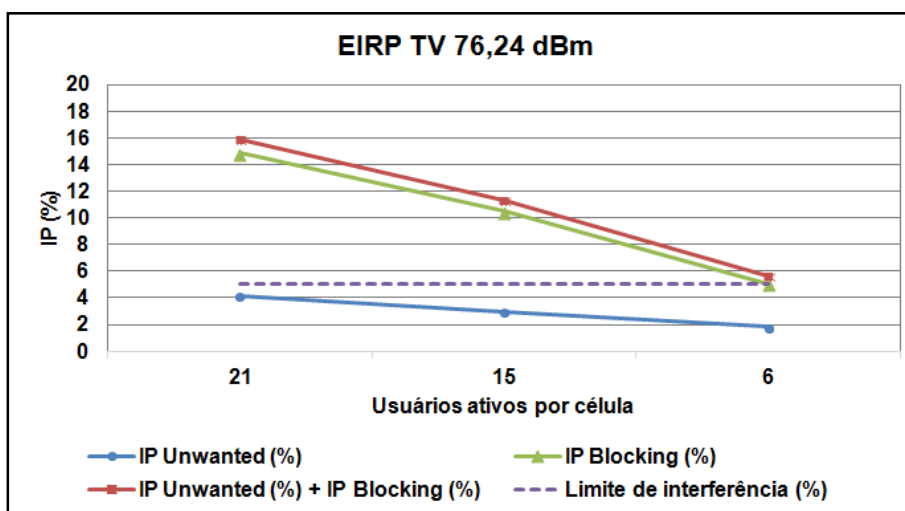


Figura 6.14: Caso III: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência

6.2.4. Caso IV

Os resultados obtidos nos três casos anteriores mostraram também que a interferência *blocking* foi dominante em relação a *unwanted*. Ou seja, o filtro da *Proeletronic* não apresentou seletividade suficiente para reduzir a IP total até o limiar estabelecido, mesmo com a redução do número de usuários LTE a apenas 6

usuários por célula. Assim, a curva de ACS do Filtro E da Universidade Mackenzie foi utilizada como máscara de bloqueio do receptor-vítima, como forma de reduzir a interferência de *blocking*. Cabe ressaltar que este é um filtro ideal, difícil de realizar na prática, mas foi utilizado como referência a ser buscada.

Os parâmetros de entrada para esta análise de interferência são apresentados na Tabela 6.8. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 6.15 a 6.17.

Tabela 6.8: Parâmetros de entrada do Caso IV

EIRP TV	76,24 dBm
Ângulo de elevação da antena transmissora de TV	-5°
Máscara de bloqueio do receptor-vítima	Filtro do receptor E, testado pela Universidade Mackenzie

Na Figura 6.15, é possível perceber que ao inserir a curva ACS, referente aos valores da razão de proteção do Filtro E, a interferência *blocking* foi anulada. A razão dRSS/iRSS para o cenário com 21 usuários ativos na célula foi de 61 dB.

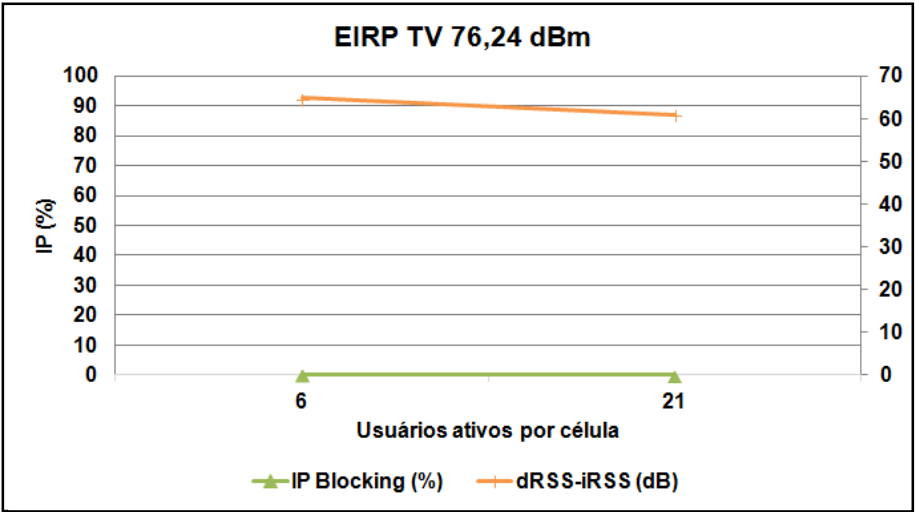


Figura 6.15: Caso IV: Resultados da probabilidade de bloqueio (*blocking*) e da razão C/I

Na Figura 6.16, é possível observar que a probabilidade de eventos válidos ficou em torno de 97,4%.

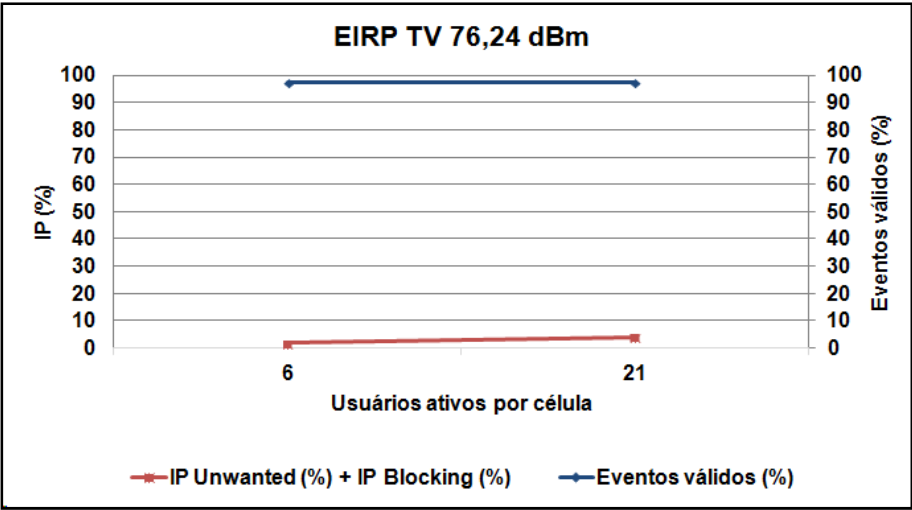


Figura 6.16: Caso IV: Resultados da combinação das probabilidades de bloqueio (*blocking*) e indesejada (*unwanted*) e da probabilidade de eventos válidos

Os resultados apresentados na Figura 6.17 mostram que a IP total para o cenário com 6 usuários ativos foi de 1,7%, desta forma, aumentou-se este número para 21, obtendo um valor de IP de 4,1%.

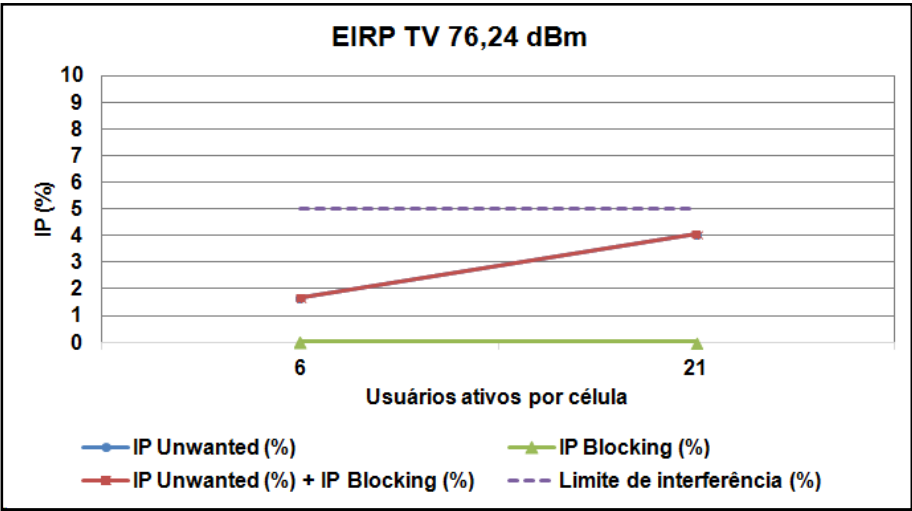


Figura 6.17: Caso IV: Resultados da probabilidade para os vários modos de interferência

A Tabela 6.9 apresenta um resumo dos parâmetros que permitem o convívio harmonioso entre os sistemas de TV Digital e LTE, obtidos a partir das simulações realizadas.

Tabela 6.9: Parâmetros para convívio harmonioso entre os sistemas

EIRP TV	76,2 dBm
Ângulo de elevação da antena transmissora de TV	-5°
Máscara de bloqueio do receptor-vítima	Filtro com ACS ≥ 70 dB
Usuários ativos na célula	21
Razão dRSS/iRSS	≥ 61 dB

7 Conclusões

O presente trabalho objetivou o estudo de interferência entre os sistemas de TV Digital e LTE operando em canais adjacentes na faixa de 700 MHz, visando avaliar a possibilidade de convivência harmoniosa entre estes serviços.

Esta faixa de 700 MHz foi escolhida, pois ela faz parte do dividendo digital resultante da digitalização dos sistemas de TV aberta em curso no Brasil, como em outras partes do mundo. A faixa vacante está sendo atribuída por órgãos reguladores de telecomunicações, em todo o mundo, para serviços móveis de banda larga 4G e 5G.

Segundo informações recentes divulgadas pela ANATEL, “O Brasil fechou dezembro de 2014 com 6,76 milhões de acessos móveis LTE (de quarta geração), o que representa um crescimento de 416,55% em relação a dezembro de 2013, quando havia 1,31 milhão de linhas ativas de 4G”. Assim, é fundamental que novas faixas de frequências sejam liberadas, de modo a atender o crescimento dos serviços de telecomunicações, principalmente, a banda larga móvel.

Este estudo envolveu campanhas de medições em campo dos efeitos de interferência a partir da construção de cenários envolvendo um número mínimo de transmissores e receptores dos dois sistemas, e simulações de cenários de larga escala, para permitir avaliar os efeitos da interferência agregada.

A realização de testes de campo nos sistemas brasileiros é importante para conhecer e definir parâmetros técnicos e operacionais que conduzirão à convivência entre os sistemas LTE e TV Digital, bem como as medidas necessárias para evitar ou solucionar possíveis interferências que degradem o desempenho dos sistemas acima de limites considerados aceitáveis.

Vários cenários de interferência entre os sistemas de TV Digital e LTE foram avaliados, considerando a variação da interferência em canal adjacente com a distância e posição relativa entre os dispositivos referentes a cada sistema.

A interferência foi medida entre os canais de TV 49, 50 e 51, que são os correspondentes adjacentes inferiores à faixa de *uplink* da canalização banda 28 do 3GPP, e os blocos de *uplink* e *downlink* do LTE. A partir de um cenário de referência, em que os limiares de recepção da TV Digital para os modos *full-seg* e *one-seg* foram determinados sem a presença de sinais interferentes, foram realizadas medições em seis cenários com interferência que permitiram determinar a degradação deste limiar pela interferência causada tanto pelo *downlink* (DL) do sistema LTE (transmissões da estação rádio-base *eNodeB*) e pela interferência causada pelo *uplink* (UL) do sistema LTE (transmissões dos terminais móveis, ou U.E.'s). O pior cenário ocorre quando a interferência é avaliada entre o canal 51 de TV e o bloco LTE UL, devido à distância mínima de frequência com base no plano de espectro. Com o U.E. operando em frente à antena do receptor de TV, a uma distância de 1,5 m, foi verificada degradação de 19,15 dB no limiar de recepção de TV para o modo *full-seg* e 9,3 dB no *one-seg* no canal 51, em relação ao Teste 1 do Capítulo 3. Já nos canais 49 e 50 não se observaram efeitos significativos de interferência.

Quanto à interferência da TV Digital sobre o sistema LTE, a vazão deste sistema foi afetado de diferentes formas dependendo da posição relativa entre o transmissor de TV e o U.E.. Em algumas situações, o efeito foi desprezível, mas no pior caso, a vazão caiu de 16 Mbps para cerca de 2 Mbps. Ainda assim, em todos os casos a comunicação de dados no sistema LTE continuou possível, ainda que degradada.

A conclusão é ser possível a convivência entre os dois sistemas, mas com degradação em ambos, ou seja, redução da cobertura da TV Digital devida ao aumento do limiar de recepção quando o usuário utiliza o celular em frente ao receptor de TV, e redução da vazão do equipamento do usuário LTE quando próximo das antenas transmissoras de TV.

As medições, entretanto, só podem ser realizadas em um número limitado de cenários. Além disso, não permitem considerar o efeito agregado da interferência de múltiplas estações rádio-base e equipamentos de usuário sobre múltiplos receptores de TV, nem o tratamento estatístico requerido pelo problema que envolve sistemas interferente e interferido em posições relativas aleatórias, gerando sinais desejado e interferentes sujeitos a efeitos aleatórios do canal de propagação.

Para permitir este tratamento, os resultados das medições foram utilizados para validar a utilização do programa SEAMCAT, uma ferramenta computacional de simulação, que emprega o método de Monte Carlo e permite a realização de um grande número de eventos com as posições relativas dos sistemas e respostas dos canais de propagação descritos por distribuições de probabilidade com parâmetros conhecidos. Entre outros resultados, o programa permite determinar a probabilidade de interferência entre os sistemas tanto por emissões indesejadas (transmissões fora de faixa do sistema interferente) quanto por bloqueio do sistema interferido (limitações de filtragem do receptor-vítima). Os cenários estáticos em que se realizaram as medições foram simulados no SEAMCAT e, em quase todos os casos, houve excelente concordância entre os resultados das simulações e os resultados das medições. Isto permitiu considerar o programa uma ferramenta válida para simular cenários mais complexos e com características aleatórias. Foram, então, construídos cenários representando situações próximas da realidade, com um transmissor e múltiplos receptores de TV operando no canal 51, último canal de TV adjacente à banda de LTE, e *clusters* hexagonais de estações rádio-base compostos por células de três setores e um grande número de usuários transmitindo a pequenas distâncias de receptores de TV na banda adjacente de 10 MHz. Foram simulados cenários com diferentes potências de transmissão de sinal de TV (EIRP de 60 a 80 dBm, correspondentes à classe especial e superespecialista) e áreas de cobertura da TV Digital (10 e 20 km), e distâncias entre o equipamento do usuário LTE e o receptor de TV (1 e 2 m).

Na análise da interferência do sistema LTE sobre a TV Digital, verificou-se que a interferência dominante, por larga margem, é a interferência de bloqueio. Isto significa que as limitações do filtro de recepção da TV, que captura potência do sinal LTE transmitido pelo equipamento do usuário na banda adjacente, são a principal causa para a redução da relação sinal-ruído mais interferência e degradação da recepção. Assim, a simples melhoria dos filtros de transmissão do sistema LTE é insuficiente como técnica de mitigação.

Quanto aos resultados, a probabilidade de interferência de 5% foi utilizada como limite máximo aceitável. Para o sistema de TV Digital com cobertura de 10 km, células LTE com 2 km de raio com 20 usuários LTE por célula, apenas com EIRP do sistema de TV de 80 dBm (classe especial), que garante maiores níveis

de sinal desejado nos receptores, a probabilidade de interferência ficou abaixo deste limiar. Quando o raio de cobertura da TV é aumentado para 20 km, a probabilidade de interferência fica acima de 5% mesmo com esta EIRP máxima. A seguir, os testes foram repetidos com células de 1 km de raio, mas verificou-se que as variações da probabilidade de interferência foram marginais.

Como a melhoria dos filtros dos receptores de TV é uma solução difícil na prática, não só pela grande quantidade de receptores de TV já em operação como pelo impacto no custo de futuros receptores, duas formas de mitigação de interferências foram consideradas: a limitação da potência de transmissão dos *eNodeB* e a limitação do número de usuários LTE por setor. A redução de potência dos *eNodeB* não afetou de forma significativa a probabilidade de interferência, indicando que a interferência causada pelos equipamentos de usuário é o efeito dominante. Para manter a probabilidade de interferência abaixo do limiar de 5% nos casos de interesse, foi necessário reduzir a potência de transmissão do U.E. de 23 dBm para 14 dBm.

Usando alguns destes cenários, foram avaliados os efeitos da interferência da TV Digital no sistema LTE. A degradação de desempenho do sistema LTE foi medida pela taxa média de transmissão por usuário, cujo limiar de perda considerado aceitável é 30%, e pelo número de usuários ativos (capacidade) sendo o limiar de perda de capacidade aceitável igual a 5%.

Foram considerados raios de célula de 500 m a 5 km, com os demais parâmetros mantidos. No *downlink* do sistema LTE (transmissão do *eNodeB* para o usuário) a capacidade cai com o aumento do raio da célula, como esperado, mas não há perda de capacidade e a perda de taxa de transmissão dos usuários é sempre inferior a 1%. Já no *uplink* do sistema LTE, embora também não ocorra perda de capacidade, a perda na taxa média de transmissão dos usuários fica acima de 40% para células com raio maior que 2 km. Apenas para células de 500 m de raio esta perda fica em 28%, abaixo do limiar estabelecido de 30%.

Finalmente, foi realizado um estudo de caso próximo da realidade considerando um sistema celular e um sistema de TV operando atualmente no Rio de Janeiro, apenas adaptando as frequências de operação para criar a situação de interferência que poderá ocorrer no futuro, quando o sistema celular efetivamente

ocupar a faixa de 700 MHz. Os resultados confirmaram as observações obtidas nas simulações de cenários idealizados, considerados anteriormente. A interferência dominante é a de bloqueio, devida às limitações na seletividade dos filtros dos receptores de TV. Para permitir a convivência harmoniosa entre os dois sistemas, quando operando em faixas de frequência imediatamente adjacentes, é necessário operar com potências de transmissão de TV elevadas, aumentando o nível de sinal desejado no receptor de TV, e limitar de forma importante o número de usuários ativos por setor. Para superar estas limitações, permitindo o aumento da capacidade dos sistemas celulares, seria necessário melhorar significativamente a máscara do filtro do receptor de TV.

Em resumo pode-se concluir que é possível a convivência entre os dois sistemas operando em faixas de frequência adjacentes desde que algumas medidas sejam tomadas para mitigar os efeitos de interferência. A solução ideal é a melhoria dos filtros de transmissão e recepção de ambos os sistemas, mas esta é uma solução, na melhor das hipóteses, de médio prazo e que envolve aumento de custo dos equipamentos. De acordo com os resultados apresentados, as alternativas são utilizar as potências de transmissão mais elevadas permitidas nos transmissores de TV Digital, limitar a potência de transmissão dos usuários LTE e o número de usuários LTE ativos por setor de célula. Estas soluções são factíveis, mas têm alguns efeitos adversos.

Sugestões para a continuidade deste trabalho são: a análise de casos com transmissores de TV de classes mais baixas simulando a operação em pequenas cidades e em regiões rurais; a determinação de características de filtros, para ambos os sistemas, que permitam limitar as interferências mútuas a níveis adequados. Um outro trabalho de interesse é o estudo do uso de técnicas cognitivas nos terminais de usuário do sistema celular. Isto permitiria que a limitação de potência de transmissão destes dispositivos fosse realizada em tempo real e apenas nas situações em que fosse realmente necessária.

Referências bibliográficas

- [1] Cho, In-kyoung; Lee, Il-kyoo; Park, Youn-ok, "Study on coexistence between long term evolution and digital broadcasting services," International Journal of Advanced Science and Technology, vol. 38, pp. 75-92, January 2012.
- [2] International Telecommunication Union - ITU, "Digital Dividend: Insights for Spectrum Decisions," August 2012. Disponível em: <http://www.itu.int/ITU-D/tech/digital_broadcasting/Reports/DigitalDividend.pdf>. [Acesso em 29 Março 2015].
- [3] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, "Consulta Pública No. 18: Proposta de Regulamento sobre condições de convivência entre o serviço de radiodifusão de sons e imagens do SBTVD e os serviços de radiocomunicação operando na faixa de 698 MHz a 806 MHz," 28 Abril 2014. Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/SACP>>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [4] Peres, Francisco de Assis Campos, "Estudo de Modelos de Radiopropagação para Recepção Fixa de TV Digital na Faixa de UHF," Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [5] Kim, Dae-Hee; Oh, Seong-Jun; Woo, JungSoo, "Coexistence Analysis between IMT System and DTV System in the 700MHz Band," International Conference on ICT Convergence (ICTC), pp. 284-288, October 2012.
- [6] Sesia, Stefania; Toufik, Issam; Baker, Matthew, LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [7] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, "Relatório de Teste Laboratorial de Interferência do LTE na faixa de 700 MHz no ISDB-T," 2014. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>>. [Acesso em 26 Março 2015].

- [8] Universidade Presbiteriana Mackenzie, “Relatório dos testes de interferência do sinal LTE na TV Digital na faixa de UHF,” Novembro 2013. Disponível em: <[http://www.set.org.br/tecnologia/RELATÓRIO MACKENZIE TESTES LTE.pdf](http://www.set.org.br/tecnologia/RELATÓRIO_MACKENZIE_TESTES_LTE.pdf)>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [9] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Relatório do Teste em Campo sobre a Convivência do LTE na faixa de 700 MHz com ISDB-T,” Abril 2014. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [10] Mathe, Dércio Manuel, “Estudo da interferência entre sistemas LTE e de TV Digital em canal adjacente na faixa dos 700 MHz,” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Novembro 2014.
- [11] International Telecommunication Union - ITU, "Report ITU-R BT.2035-1: Guidelines and techniques for the evaluation of digital terrestrial television broadcasting systems," Genève, Switzerland, 2004.
- [12] Rodriguez, Carlos; Okamoto, Danielle; Pudwell, Marta, “Projeto de Testes de coexistência entre o Sistema Brasileiro de Televisão Digital e o LTE na faixa de 700MHz (Banda 28 3GPP). Testes de Campo realizados no campus do Inmetro,” Rio de Janeiro, 2014.
- [13] European Communications Office - ECO, “Handbook SEAMCAT,” January 2010. Disponível em: <[http://www.cept.org/files/1050/documents/SEAMCAT Handbook January 2010.pdf](http://www.cept.org/files/1050/documents/SEAMCAT_Handbook_January_2010.pdf)>. [Acesso em 24 Março 2015].
- [14] Ministério das Comunicações, “Portaria nº 481, de 9 de Julho de 2014,” 10 Julho 2014. Disponível em: <<http://www.mc.gov.br/legislacao/por-assunto/radio-e-tv/tv-digital/portaria-n-481-de-09-de-julho-de-2014>>. [Acesso em 24 Março 2015].
- [15] Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações - CPqD, “Análise de Utilização do Espectro de 700 MHz - Etapa II,” 2012. Disponível em: <http://www.sinditelebrasil.org.br/component/docman/doc_download/18-contribuicoes-sobre-o-dividendo-digital-2?Itemid=>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [16] Kalogirou, Vasilis P.; Nanou, Elena D.; Capsalis, Nicolas C.; et all., "Compatibility of DVB-T Services and IMT-2000 Compliant Mobile Telecommunications in the UHF Band of 470 – 862 MHz," Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services,

2009. TELSIX '09. 9th International Conference on , pp. 247-254, 7-9 October 2009.
- [17] Loureiro, Rodrigo Zerbone, “Resolução e Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 698 MHz a 806 MHz,” Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, 31 Outubro 2013. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/documentos/sala_imprensa/31-10-2013--18h5min29s-Apresentação_Regulamento_698-806_MHz.pdf>. [Acesso em 06 Outubro 2014].
- [18] infoDev/ITU ICT Regulatory Toolkit, “Radio Spectrum Management,” Disponível em: <<http://www.ictregulationtoolkit.org/sectionexport/pdf/5>>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [19] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Nota Técnica No. 23 2012-CMPR/SCM,” 3 Outubro 2012. Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/sicap/web/displayWeb.asp?id=4081995>>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [20] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Resolução nº 398, de 7 de abril de 2005,” Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2005/288-resolucao-398>>. [Acesso em 13 Junho 2016].
- [21] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Resolução nº 284, de 7 de dezembro de 2001,” Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2001/270-resolucao-284>>. [Acesso em 06 Março 2016].
- [22] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Consulta Pública nº 12: Proposta de Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 698 MHz a 806 MHz,” 27 Fevereiro 2013. Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/SACP/Contribuicoes/BuscaConsultaNovo.asp>>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [23] Wang, Weidong; Wang, Ben; Lv, Zhi; Huang, Wei; Zhang, Yinghai, "Analysis of Interference from digital terrestrial television broadcast to LTE TDD in digital dividend spectrum," Network Infrastructure and Digital Content, 2010 2nd IEEE International Conference on, pp. 692-697, September 2010.
- [24] 4G Americas, “The benefits of digital dividend,” September 2012. Disponível em: <http://www.4gamericas.org/files/8314/0759/4480/4G_Americas-Benefits_of_Digital_Dividend-September_2012.pdf>. [Acesso em 24

Março 2015].

- [25] Asia-Pacific Telecommunity - APT, Disponível em: <<http://www.apr.int/APT-Introduction>>. [Acesso em 24 Março 2015].
- [26] 3rd Generation Partnership Project - 3GPP, “3GPP TS 36.101 V12.5.0 - Technical Specification: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception,” 2014. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/12.05.00_60>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [27] ETSI, “ETSI TS 136.104 V11.2.0 - Technical Specification: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception,” November 2012. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/11.02.00_60>. [Acesso em 25 Março 2015].
- [28] AHCIET, “Latin América 'Challenge 2020' Investments to bridge the digital divide,” 13 May 2014. Disponível em: <http://ahciet.net/index.php/eventos/presentaciones/doc_download/231-english-version-latin-america-challenge-2020-investments-to-bridge-the-digital-divide>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [29] Iskandar; Dubari, Andre Muslim, "On The Evaluation of Spectrum Utilization and Digital Dividend Issue for Broadband Wireless Technology and Digital TV," IEEE 2012 7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), pp. 244-248, 30-31 October 2012.
- [30] GSMA/Deloitte, “Observatório Móvel Brasil 2012,” 2012. Disponível em: <http://www.gsma.com/publicpolicy/wp-content/uploads/2012/03/gsma_brazil_mobile_observatory_ptg.pdf>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [31] GSMA, “The Mobile Economy: Latin America 2014,” 2014. Disponível em: <<http://www.gsmamobileeconomylatinamerica.com>>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [32] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Resolução No. 625: Aprova a Atribuição, a Destinação e o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 698 MHz a 806 MHz,” 11 Novembro 2013. Disponível em: <<http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/2013/644-resolucao-625>>. [Acesso em 26 Março 2015].

- [33] ABERT, Abra e ABRATEL, “Contribuição ABERT para a Proposta de Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências, na Faixa de 698 MHz a 806 MHz,” 27 Fevereiro 2013. Disponível em: <<http://www.abert.org.br/web/index.php/tecnicabiblioteca/category/dividendo-digital-700-mhz>>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [34] GSMA/Telecom Advisory Services, LLC, “Social and economic benefits of using the lower portion of the UHF band for IMT,” November 2014. Disponível em: <<http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/11/Benefits-of-IMT-in-sub-700-MHz-English-version2.pdf>>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [35] Grant, Paul, “Report for GSMA on the Coexistence of ISDB-T and LTE,” 29 November 2013. Disponível em: <<http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/01/ATDI.Report-on-LTE-and-ISDB-T-coexistence-study-Issue-1.-2013.pdf>>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [36] SET, “Testes de interferência do sinal LTE na recepção de TV Digital na faixa de UHF,” Fevereiro 2014. Disponível em: <[http://www.set.org.br/tecnologia/SET - Resultados dos testes de interferência do 4G_LTE__10.02.2014.pdf](http://www.set.org.br/tecnologia/SET_-_Resultados_dos_testes_de_interferencia_do_4G_LTE__10.02.2014.pdf)>. [Acesso em 26 Março 2015].
- [37] Chor, Alexandre; Dai, Wei; Zhang, Chi, “Performance Analysis on VoIP over LTE network,” 2015. Disponível em: <<http://www.sfu.ca/~lchor/Ensc%20427/427%20Final%20Report.pdf>>. [Acesso em 13 Junho 2016].
- [38] Chaves, Fabiano de Sousa; Ruismaki, Rauno, “LTE 700 MHz: Evaluation of the Probability of Interference to Digital TV,” Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th, pp. 1-7, 14-17 September 2014.
- [39] ABNT, “Norma Brasileira ABNT NBR 15601: Televisão digital terrestre — Sistema de transmissão,” Abril 2008.
- [40] ABNT, “Norma Brasileira ABNT NBR 15604: Televisão digital terrestre — Receptores,” Dezembro 2007.
- [41] International Telecommunication Union - ITU, “ITU-R SM.1541-5: Unwanted emissions in the out-of-band domain,” August 2013. Disponível em: <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1541-5-201308-I!!PDF-E.pdf>. [Acesso em 29 Março 2015].
- [42] International Telecommunication Union - ITU, “ITU-R SM.329-7: Spurious emissions,” 1997. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.329-7-199707-S!!PDF-E.pdf>. [Acesso em 29 Março 2015].

2015].

- [43] International Telecommunication Union - ITU, "Recommendation ITU-R SM.328-11: Spectra and bandwidth of emissions," 2006. Disponível em: <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.328-11-200605-I!!PDF-E.pdf>. [Acesso em 29 Março 2015].
- [44] Okamoto, D. M.; Silva Mello, L. A. R.; Almeida, M. P. C., "Análise da coexistência do LTE com ISDB-TB em 700 MHz," em XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, Juiz de Fora, MG, Setembro 2015.
- [45] Okamoto, D. M.; Silva Mello, L. A. R.; Almeida, M. P. C., "Analysis of the interference from LTE system in ISDB-TB Digital TV system at 700 MHz," Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International, pp. 1-5, 03-06 November 2015.
- [46] Okamoto, D. M.; Silva Mello, L. A. R.; Almeida, M. P. C.; Ron, C. V. R., "Medidas e simulações da interferência entre TV Digital e LTE na faixa de 700 MHz," em 12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo/17º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, Porto Alegre, RS, Julho 2016.
- [47] Organización de Los Estados Americano, "Auction of the 700 MHz in Brazil," 12 February 2015. Disponível em: <http://www.oas.org/es/citel/Terminado/P2!R-3775_i.doc>. [Acesso em 22 Fevereiro 2016].
- [48] Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), "Programa de Análise de Produtos: Relatório sobre Análise em Banda Larga Móvel - Internet 3G e 4G," 2015. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/banda_larga_movel.pdf>. [Acesso em 20 Fevereiro 2016].
- [49] International Telecommunication Union (ITU), "Recommendation ITU-R P.1546-5: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz," Geneva, 2013.
- [50] ZTE Corporation, "APT 700MHz: Best Choice for nationwide coverage," June 2013. Disponível em: <<http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2013/07/ZTE-LTE-APT-700MHz-Network-White-Paper-ZTE-June-2013.pdf>>. [Acesso em 22 Fevereiro 2016].
- [51] International Telecommunication Union - ITU, "Report ITU-R BT.2247-1: Field measurement and analysis of," Geneva, August 2012.

- [52] SEAMCAT Technical Group, “CDMA uplink Power Control Methodology in SEAMCAT,” October 2003. Disponível em: <<http://www.archive.ero.dk/E8593BFF-68CA-4E26-8387-C9B92D0DB4E3?frames=no&.>>. [Acesso em 20 Fevereiro 2016].
- [53] Arcans, G.; Stankevicius, E.; Bobrovs, V.; Paulikas, S., “Evaluation of LTE 700 and DVB-T Electromagnetic Compatibility in Adjacent Frequency Bands,” Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, pp. 585-589, July 2015.
- [54] Santos, Diego dos, “Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE,” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril de 2010.
- [55] Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão, “Testes de interferência do sinal LTE na recepção de TV Digital na faixa de UHF,” 10 Fevereiro 2014. Disponível em: <http://www.set.org.br/tecnologia/SET%20-%20Resultados%20dos%20testes%20de%20interfer%C3%Aancia_do_4G_LTE__10.02.2014.pdf>. [Acesso em 22 Fevereiro 2016].
- [56] International Telecommunication Union - ITU, “RECOMMENDATION ITU-R BT.1368-10, Planning criteria, including protection ratios, for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands,” Geneva, January 2013.
- [57] 3rd Generation Partnership Project - 3GPP, “Technical Report: 3GPP TR 36.942 V11.0.0 (2012-09) Radio Frequency (RF) system scenarios,” 2016.
- [58] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Sistema de Serviços de Telecomunicações,” Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/stel/>>. [Acesso em 03 Março 2016].
- [59] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Sistema de Controle de Radiodifusão,” Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/srd/>>. [Acesso em 03 Março 2016].
- [60] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Sistema de Informações Geográficas do Brasil,” Disponível em: <<http://sistemas.anatel.gov.br/siganatel/>>. [Acesso em 03 Março 2016].
- [61] Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, “Sistema de Informação dos Serviços de Comunicação de Massa,” Disponível em:

<<http://sistemas.anatel.gov.br/siscom/>>. [Acesso em 03 Março 2016].

Anexo A – Medidas do LTE na TV Digital

As Tabelas A.1 e A.2 apresentam os dados do *setup* de interferência de LTE em TV Digital:

Tabela A.1: Dados do *setup* (Canal 51)

MEDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA EM TV DIGITAL COM <i>ENODEB</i>		
PARÂMETROS	VALORES	OBSERVAÇÕES
ALTURA ANTENA TX DE TV	15 m	
ALTURA ANTENA <i>eNodeB</i>	5 m	Acima de mastro pequeno.
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - TX TV	60 m	
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - RX TV	15 m	
ALTURA RX TV	2 m	
GANHO DA ANTENA TV	14 dBi	

Tabela A.2: Dados do *setup* (Canal 49 e 50)

MEDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA EM TV DIGITAL COM <i>ENODEB</i>		
PARÂMETROS	VALORES	OBSERVAÇÕES
ALTURA ANTENA TX DE TV	15 m	
ALTURA ANTENA <i>eNodeB</i>	8 m	Acima de mastro telescópico.
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - TX TV	60 m	
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - RX TV	15 m	
ALTURA RX TV	2 m	
GANHO DA ANTENA TV	14 dBi	

(a) Teste 1: Os resultados são apresentados nas Tabelas A.3, A.4 e A.5

Tabela A.3: Nível de sinal de TV Digital recebido sem *eNodeB* operando – canal 49

Piso de ruído = -77,2 dBm						Potência recebida (analisador espectro)		Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-55,6	-	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-64,7	-	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-72,2	-	OK	OK
-50,5	1	42,5	10	14,5	-4,5	-73,3	-	OK	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-77,4	-	PERDEU SINAL	OK
-52	1	42,5	10	14,5	-6	-77,2	-	PERDEU SINAL	OK

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Tabela A.4: Nível de sinal de TV Digital recebido sem *eNodeB* operando – canal 50

Piso de ruído = -77,2 dBm						Potência recebida (analisador espectro)		Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-55,6	-	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-64,7	-	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-72,2	-	OK	OK
-50,5	1	42,5	10	14,5	-4,5	-73,3	-	OK	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-77,4	-	PERDEU SINAL	OK
-52	1	42,5	10	14,5	-6	-77,2	-	PERDEU SINAL	OK

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Tabela A.5: Nível de sinal de TV Digital recebido sem eNodeB operando – canal 51

Piso de ruído = -73,8 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-20	1	42,5	10	14,5	26	-28,3	OK	OK
-30	1	42,5	10	14,5	16	-39,2	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-48,6	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-57,8	OK	OK
-52	1	42,5	10	14,5	-6	-70	OK	PERDEU SINAL
-53	1	42,5	10	14,5	-7	-69,5	OK	PERDEU SINAL
-54	1	42,5	10	14,5	-8	-71,11	OK	PERDEU SINAL
55	1	42,5	10	14,5	-9	-71,4	RUIM	PERDEU SINAL

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Sony. Analisador de espectro com LNA de 20 dB. Valores de potência recebida de TV são 20 dB menores do que os apresentados na tabela.

Piso de ruído = -77,2 dBm						Potência recebida (analisador espectro)		Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-56	-24,6	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-67,5	-24,6	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-75,4	-24,6	OK	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-77,4	-24,6	PERDEU SINAL	OK
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.			
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]				
39,03	3	16,1			52,13				

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Tabela A.7: Nível de sinal de TV Digital recebido com *eNodeB* (somente *downlink* em *idle*) operando em 8 W – canal 50

Piso de ruído = -77,2 dBm						Potência recebida (analisador espectro)		Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	<i>eNodeB</i>		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-56	-24,6	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-67,5	-24,6	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-75,4	-24,6	OK	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-77,4	-24,6	PERDEU SINAL	OK
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (<i>eNodeB</i> - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.			
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]				
39,03	3	16,1			52,13				

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Tabela A.8: Nível de sinal de TV Digital recebido com *eNodeB* (somente *downlink* em *idle*) operando em 8 W – canal 51

Piso de ruído = -58,90 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-38,4	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-48,8	OK	PERDEU SINAL
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-55,6	OK	PERDEU SINAL
-52	1	42,5	10	14,5	-6	-59	OK	PERDEU SINAL
-55	1	42,5	10	14,5	-9	PISO DE RUÍDO	DEFEITO	PERDEU SINAL
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (<i>eNodeB</i> - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.		
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]			
39,03	3	16,1			52,13			

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B. Analisador de espectro com LNA de 20 dB. Valores de potência recebida de TV são 20 dB menores do que os apresentados na tabela.

Piso de ruído = -56,5 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-48,3	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-47,4	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-55,3	OK	PERDEU SINAL
-52	1	42,5	10	14,5	-6	-56,3	OK	PERDEU SINAL
-55	1	42,5	10	14,5	-9	PISO DE RUÍDO	DEFEITO	PERDEU SINAL
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.		
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]			
39,03	3	16,1			52,13			

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Sony. Analisador de espectro com LNA de 20 dB. Valores de potência recebida de TV são 20 dB menores do que os apresentados na tabela.

Piso de ruído = -56,25 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-43,6	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-53,7	OK	DEFEITO
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-55,5	OK	PERDEU SINAL
-52	1	42,5	10	14,5	-6	-55,8	OK	PERDEU SINAL
-55	1	42,5	10	14,5	-9	PISO DE RUÍDO	DEFEITO	PERDEU SINAL
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.		
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]			
39,03	3	16,1			52,13			

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Sony. Analisador de espectro com LNA de 20 dB. Valores de potência recebida de TV são 20 dB menores do que os apresentados na tabela.

Piso de ruído = -76,5 dBm						Potência recebida (analisador espectro)		Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-54,8	-24,6	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-67,6	-24,6	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-73,6	-24,6	OK	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-76,5	-24,6	PERDEU SINAL	OK
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.			
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]				
39,03	3	16,1			52,13				

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Piso de ruído = -76,5 dBm						Potência recebida (analisador espectro)		Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-54,8	-24,6	OK	OK
-40	1	42,5	10	14,5	6	-67,6	-24,6	OK	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-73,6	-24,6	OK	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-76,5	-24,6	PERDEU SINAL	OK
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.			
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]				
39,03	3	16,1			52,13				

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Piso de ruído = -54,7 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-15	1	42,5	10	14,5	31	-30,4	OK	OK
-30	1	42,5	10	14,5	16	-45,4	OK	PERDEU SINAL
-40	1	42,5	10	14,5	6	-36,9	DEFEITO	PERDEU SINAL
-43	1	42,5	10	14,5	3	-35,55	SEM SINAL	PERDEU SINAL
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-41,8	SEM SINAL	PERDEU SINAL
-55	1	42,5	10	14,5	-9	-40	SEM SINAL	PERDEU SINAL
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.		
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]			
39,03	3	16,1			52,13			

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Sony. Analisador de espectro com LNA de 20 dB. Valores de potência recebida de TV são 20 dB menores do que os apresentados na tabela.

A Tabela A.14 apresenta os dados do *setup* de interferência de LTE em TV Digital utilizando receptor nos modos *one-seg* e *full-seg*:

Tabela A.14: Dados do *setup* – Canal 51

MEDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA EM TV DIGITAL COM <i>ENODEB</i>		
PARÂMETROS	VALORES	OBSERVAÇÕES
ALTURA ANTENA TX DE TV	15 m	
ALTURA ANTENA <i>eNodeB</i>	8 m	Acima de mastro telescópico.
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - TX TV	60 m	
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - RX TV	15 m	
ALTURA RX TV	2 m	
GANHO DA ANTENA TV	14 dBi	

Piso de ruído = -77,2 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-42	1	42,5	10	14,5	4	-68,7	OK	-
-43	1	42,5	10	14,5	3	-69,1	DEFEITO SEVERO	-
-46	1	42,5	10	14,5	0	-70,9	SEM ÁUDIO/DEFEITO	-
-47	1	42,5	10	14,5	-1	-71,2	DEFEITOS DE VÁRIOS QUADROS PARADOS	-
-48	1	42,5	10	14,5	-2	-72,2	PERDEU SINAL	-
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.		
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]			
46,02	3	16,1			59,12			

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Piso de ruído = -76,5 dBm						Potência recebida (analisador espectro)	Full-seg	One-seg
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	TV		
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	-	-
-30	1	42,5	10	14,5	16	-54,8	OK	OK
-42	1	42,5	10	14,5	4	-70,2	DEFEITO LEVE	OK
-43	1	42,5	10	14,5	3	-70,5	DEFEITO MÉDIO	OK
-46	1	42,5	10	14,5	0	-71,7	DEFEITO MÉDIO	OK
-47	1	42,5	10	14,5	-1	-	DEFEITO MÉDIO	OK
-48	1	42,5	10	14,5	-2	-73,9	DEFEITO MÉDIO	OK
-49	1	42,5	10	14,5	-3	-73,7	DEFEITO GRAVE	OK
-50	1	42,5	10	14,5	-4	-74,4	PERDEU SINAL	OK
-51	1	42,5	10	14,5	-5	-	PERDEU SINAL	OK
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao aparelho de TV.		
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]			
39,03	3	16,1			52,13			

Setup realizado com TV e receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Receptor One-segment no mesmo receptor ISDB-T_B Telesystem TS2400. Analisador de espectro sem LNA.

Anexo B – Medidas da TV Digital no LTE

A Tabela B.1 apresenta os dados do *setup* de interferência de TV Digital em LTE:

Tabela B.1: Dados do *setup* – Canais 49, 50 e 51

MEDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA EM LTE COM TV DIGITAL (TESTE 1)	
PARÂMETROS	VALORES
ALTURA ANTENA TX DE TV	15 m
ALTURA ANTENA <i>eNodeB</i>	8 m
DISTÂNCIA <i>eNodeB</i> - TX TV	20 m
POTÊNCIA U.E.	23 dBm
ALTURA U.E.	1,4 m
DISTÂNCIA U.E. – <i>eNodeB</i>	Variável

(a) Teste 1: Os resultados são apresentados na Tabela B.2

Tabela B.2: Parâmetros do sinal LTE sem TV operando e U.E. dentro da van

VAZÃO	JITTER	PERDA DE PACOTES	OBSERVAÇÃO
29,5 Mbps	0,436 ms	0%	*PUE = 8 dBm dentro da van

*Potência do U.E.

(b) Teste 2: Os resultados são apresentados nas Tabelas B.3, B.4 e B.5

Tabela B.3: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 49. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. dentro da van

Canal 49						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB				
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-52	-45,5	13	0,26	56% (um evento e pequena queda, alto BLER)	15
-30	1	42,5	10	14,5	16	-63	-45,5	29,5	0,4	0	13-15
-40	1	42,5	10	14,5	6	-74	-45,5	29,4	0,4	0	13-15
-50	1	42,5	10	14,5	-4	PISO DE RUÍDO	-45,5	29,5	0,43	0	13
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao U.E.					
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]						
39,03	3	16,1			52,13						

*Potência do U.E.

Tabela B.4: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 50. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. dentro da van

Canal 50						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB				
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-51,5	-45,5	27,4	0,343	0,86% (um evento e pequena queda, alto BLER)	12
-30	1	42,5	10	14,5	16	-67	-45,5	29,5	0,4	0	13-14
-40	1	42,5	10	14,5	6	-74	-45,5	29,4	0,4	0	12-14
-50	1	42,5	10	14,5	-4	PISO DE RUÍDO	-45,5	29,5	0,43	0	9-11
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao U.E.					
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]						
39,03	3	16,1			52,13						

*Potência do U.E.

Tabela B.5: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 51. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. dentro da van

Canal 51						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB				
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-54	-45,5	29,5	0,4	100% (um evento)	11
-30	1	42,5	10	14,5	16	-67,8	-45,5	29,5	0,4	0	10
-40	1	42,5	10	14,5	6	-71,1	-45,5	29,4	0,4	0	8
-50	1	42,5	10	14,5	-4	PISO DE RUÍDO	-45,5	29,5	0,43	0	8
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao U.E. Resultado de <i>uplink</i> .					
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]						
39,03	3	16,1			52,13						
A potência do eNodeB no teto da van foi de -35,7 dBm.											

*Potência do U.E.

(c) Teste 3: Os resultados são apresentados na Tabela B.6

Tabela B.6: Parâmetros do sinal LTE sem TV operando e U.E. na recepção do prédio 6 (INMETRO)

VAZÃO	JITTER	PERDA DE PACOTES	OBSERVAÇÃO
17 Mbps	0,8 ms	0,4%	PUE = 22-23 dBm
A potência do eNodeB recebida pelo U.E. foi de -100 dBm.			

*Potência do U.E.

(d) Teste 4: Os resultados são apresentados nas Tabelas B.7, B.8 e B.9

Tabela B.7: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 49. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. na recepção do prédio 6 (INMETRO)

Canal 49						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB				
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-49,9	-	16	2,5	0	24
-30	1	42,5	10	14,5	16	-66,9	-	3	0,5	0	24
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao U.E. *Potência do U.E.					
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]						
39,03	3	16,1			52,13						

A potência do eNodeB recebida pelo U.E. foi de -102,5 dBm.

Tabela B.8: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 50. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. na recepção do prédio 6 (INMETRO)

Canal 50						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB				
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-51,77	-	3	3	0% (um evento)	23
-30	1	42,5	10	14,5	16	-66,1	-	11	0,7	0	23
-40	1	42,5	10	14,5	6	-74,65	-	13	1	0	23
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao U.E. *Potência do U.E.					
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]						
39,03	3	16,1			52,13						

A potência do eNodeB recebida pelo UE foi de -102,5 dBm.

Tabela B.9: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 51. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. na recepção do prédio 6 (INMETRO)

Canal 51						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV	eNodeB				
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-72,5	-	1-2	10-18	1,4% (um evento)	23
-30	1	42,5	10	14,5	16	PISO DE RUÍDO	-	10-11	0,7-2	0	23
-40	1	42,5	10	14,5	6	PISO DE RUÍDO	-	11	0,4-2	0	23
-50	1	42,5	10	14,5	-4	PISO DE RUÍDO	-	16	1,5	0	23
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora				EiRP LTE	OBS.: as medições de potência recebida são feitas sempre junto ao U.E.				
[dBm]	[dB]	[dBd]				[dBm]					
39,03	3	16,1				52,13					
A potência do eNodeB recebida pelo U.E. foi de -102,5 dBm.											

*Potência do U.E.

(e) Teste 5: Os resultados são apresentados na Tabela B.10

Tabela B.10: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 51. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. no corredor de acesso principal do prédio 6 (INMETRO)

Canal 51						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE	RSRP*
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV medido na van	Sinal de TV medido perto do U.E.					
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm	dBm
DESLIGADO	-	-	-	-	-	-	-	32	0,3	SEM PERDA	11-13	-85,4
-15	1	42,5	10	14,5	31	-47,76	-69,83	20	0,4	PERDA PEQUENA 0,2%	15-19	-85,5
-30	1	42,5	10	14,5	16	-64	-77	32	0,3	SEM PERDA	13-14	-85,7
-40	1	42,5	10	14,5	6	-72,7	Piso de ruído	32	0,3	SEM PERDA	13-14	-85,5
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora			EiRP LTE	Os parâmetros <i>Throughput</i> , <i>Jitter</i> e perda de pacotes foram obtidos pelo equipamento que estava dentro da van, coletando valores relativos ao <i>uplink</i> . A potência do <i>eNodeB</i> recebida pelo U.E. foi de -85,5 dBm.						
[dBm]	[dB]	[dBd]			[dBm]							
39,03	3	16,1			52,13							

OBS.: A primeira medição foi com o gerador de TV desligado. Quando foi colocado sinal TV Digital com -15 dBm, primeiramente o throughput caiu, depois o sistema estabilizou com os valores anotados na tabela. * RSRP - nível de sinal recebido do eNodeB.

*Potência do U.E.

(f) Teste 6: Os resultados são apresentados na Tabela B.11

Tabela B.11: Nível de sinal de TV Digital recebido próximo ao U.E. – canal 51. Parâmetros do sinal LTE com TV operando e U.E. na parte externa (rotatória) do prédio 6 do INMETRO, próximo do transmissor de TV.

Canal 51						Potência recebida (analisador espectro)		Throughput	Jitter	Perda de pacotes	PUE	RSRP*
Potência de Tx de TV	Perdas no cabo (gerador - AOP)	Ganho do AOP	Perdas no cabo (AOP - antena)	Ganho da antena Tx	EiRP TV	Sinal TV medido na van	Sinal de TV medido perto do U.E.					
[dBm]	[dB]	[dB]	[dB]	[dBi]	[dBm]	[dBm]		Mbps	ms	%	dBm	dBm
-15	1	42,5	10	14,5	31	-76	-48	30	0,3	SEM PERDA	10-12	-86
-30	1	42,5	10	14,5	16	-77 (piso de ruído)	-77	30	0,3 ou 0,2	SEM PERDA	-	-
Potência de Tx de LTE	Perdas no cabo (eNodeB - antena)	Ganho da antena transmissora				EiRP LTE	Os parâmetros <i>Throughput</i> , <i>Jitter</i> e perda de pacotes foram obtidos pelo equipamento que estava dentro da van, coletando valores relativos ao <i>uplink</i> . A potência do <i>eNodeB</i> recebida pelo U.E. foi de -86 dBm.					
[dBm]	[dB]	[dBd]				[dBm]						
39,03	3	16,1				52,13						
OBS.: * RSRP - nível de sinal recebido do <i>eNodeB</i> .												

*Potência do U.E.

Anexo C – Parâmetros de simulação de interferência do LTE na DTV

(a) Teste 1: Sem *eNodeB* operando

Tabela C.1: Parâmetros técnicos do Teste 1

<i>Link</i> vítima SBTVD	
Frequência de operação [MHz]: Canal 49, Canal 50, Canal 51	683,142856, 689,142856 695,142856
Altura da antena transmissora [m]	15
Altura da antena receptora [m]	1,5
Ganho da antena transmissora [dBi]	12
Ganho da antena receptora [dBi]	8
Diagrama de radiação da antena transmissora	Figura C.1
Diagrama de radiação da antena receptora	Figura C.2
Piso de ruído [dBm]: <i>Full-seg</i> ABNT <i>One-seg</i> ABNT	-96,42 -107,64
Sensibilidade do receptor [dBm]: <i>Full-seg</i> 64-QAM ABNT <i>One-seg</i> QPSK ABNT	-77,42 -99,64
Largura de faixa do receptor [kHz]: <i>Full-seg</i> ABNT <i>One-seg</i> ABNT	5700 430
Critério de interferência - C/I, C/(N+I), (N+I)/N, I/N [dB]: <i>Full-seg</i> [58] <i>One-seg</i> [58]	19, 19, 3, 0 8, 8, 3, 0
Modelo de propagação	Espaço livre (ITU-R P.525)
Desvio padrão do modelo de propagação [dB]	5,5

Link interferente LTE – OFDMA DL	
Frequência de operação [MHz]	760,5
Largura de faixa [MHz]	5
Potência de transmissão da BS [dBm]	-50
Altura da BS [m]:	
Canal 51	5
Canal 49 e 50	8
Altura do equipamento móvel [m]	1,5
Ganho da antena transmissora BS [dBi]	16,1
Ganho da antena receptora U.E. [dBi]:	
Full-seg	-3
One-seg	0
Diagrama de radiação da antena transmissora	Figura C.3
Modelo de propagação	Espaço livre (ITU-R P.525)
Desvio padrão do modelo de propagação [dB]	0

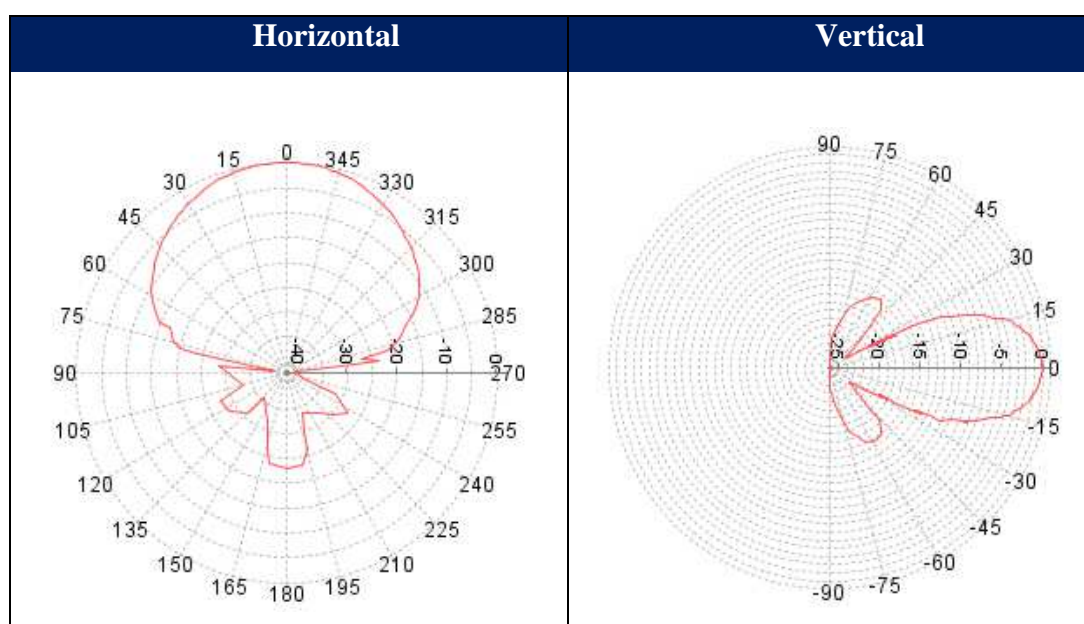


Figura C.1: Diagramas de radiação da antena painel banda larga (470 – 860 MHz) utilizada na transmissão do sinal de TV Digital. Antena da empresa *DB Digital Broadcast*, modelo APO8/N

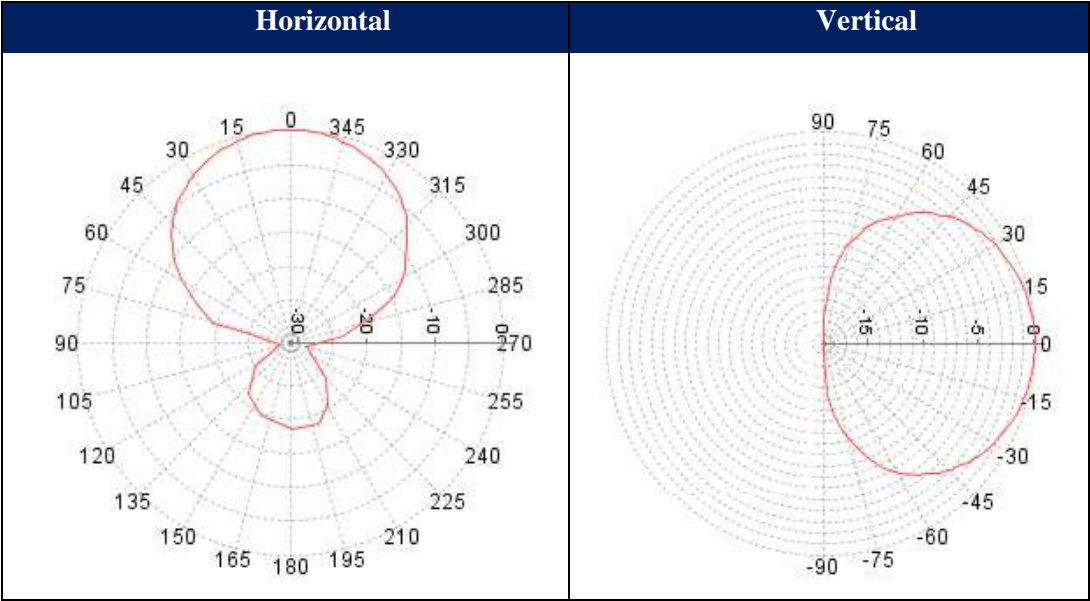


Figura C.2: Diagramas de radiação da antena diretiva UHF (600 – 860 MHz) log-periódica utilizada na recepção do sinal de TV Digital. Antena da empresa *DB Digital Broadcast*, modelo AT 54/N

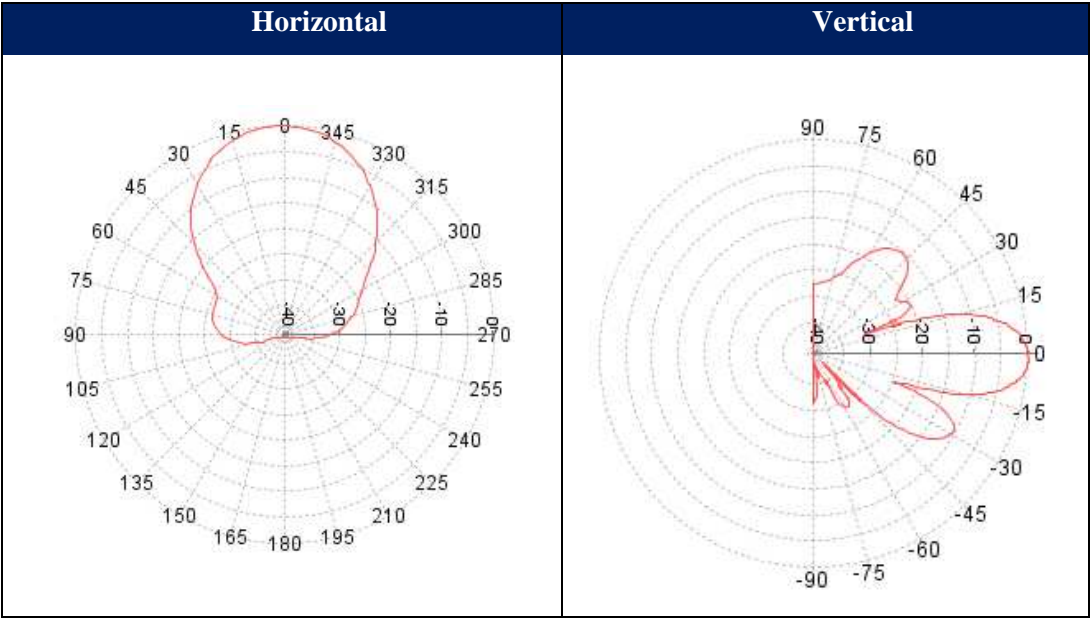


Figura C.3: Diagramas de radiação da antena painel banda larga (698 – 896 MHz) utilizada na transmissão do sinal LTE BS. Antena da empresa *RFS*, modelo APX75-864014-CT0

(b) Teste 2: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando com potência de transmissão em 8 Watt sem U.E. operando (downlink em modo idle)

Tabela C.2: Parâmetros técnicos do Teste 2

Link interferente LTE – OFDMA DL	
Potência de transmissão da BS [dBm]	39

c) Teste 3: Interferência em TV Digital com U.E. operando no interior da van

Tabela C.3: Parâmetros técnicos do Teste 3

Link interferente LTE – OFDMA UL	
Frequência de operação [MHz]	705,5
Potência de transmissão do U.E. [dBm]	23

(d) Teste 4: Interferência em TV Digital com U.E. operando ao lado da antena log-periódica receptora do sinal de TV

Os parâmetros técnicos para o Teste 4 são semelhantes aos parâmetros do teste anterior, apenas houve alteração na posição do U.E..

(e) Teste 5: Interferência em TV Digital com U.E. operando em frente à antena log-periódica receptora do sinal de TV

Os parâmetros técnicos para o Teste 5 são semelhantes aos parâmetros do teste anterior, apenas houve alteração na posição do U.E..

(f) Teste 6: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando em 40 W

Tabela C.4: Parâmetros técnicos do Teste 6

Link interferente LTE – OFDMA DL	
Potência de transmissão da BS [dBm]	46
Altura da BS [m]: Canal 51	8

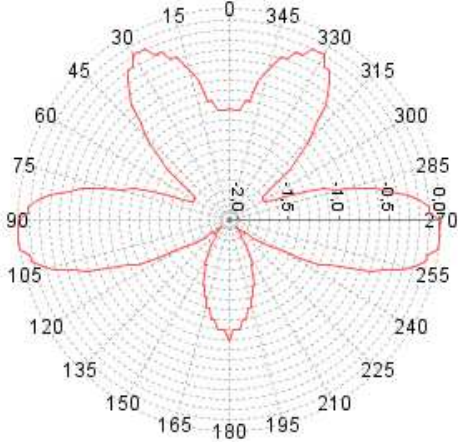
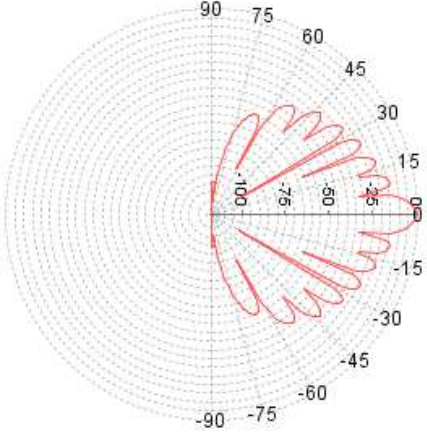
(g) Teste 7: Interferência em TV Digital com *eNodeB* operando em 8 W

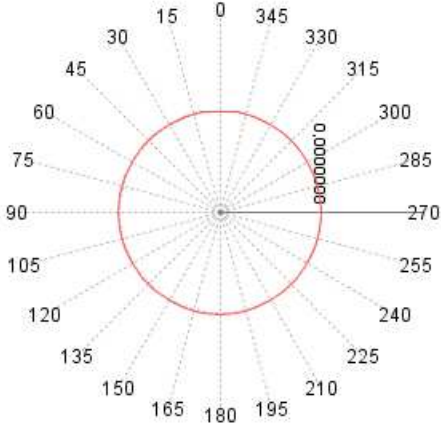
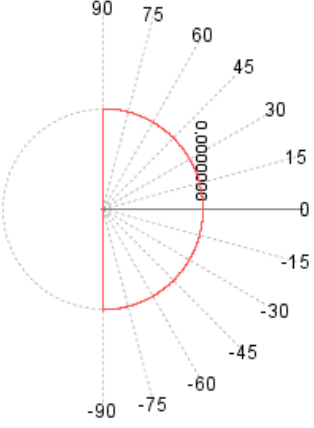
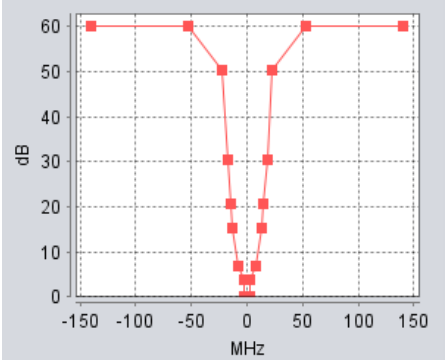
Tabela C.5: Parâmetros técnicos do Teste 7

Link interferente LTE – OFDMA DL	
Potência de transmissão da BS [dBm]	39
Altura da BS [m]: Canal 51	8

Anexo D – Parâmetros de simulação de interferência da DTV no LTE

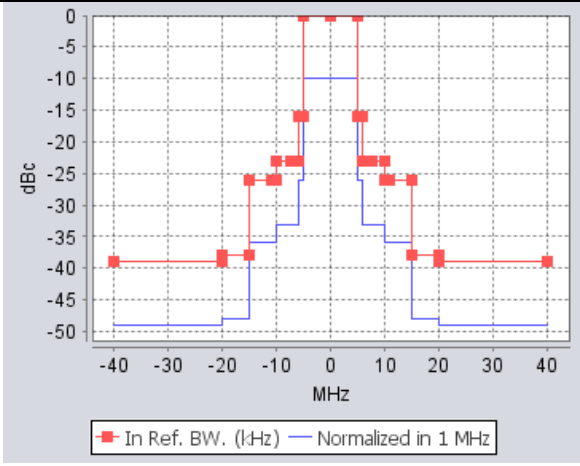
Tabela D.1: Parâmetros de simulação do sistema vítima (TV Digital)

Frequência	695,142857 MHz
Altura da antena transmissora	150 m (ABNT NBR 15601)
Antena transmissora da <i>Transtel</i> , modelo SCVO-H / SCV8-V	<div>Diagrama de radiação horizontal</div>  <div>Diagrama de radiação vertical</div> 
EIRP	60 (classe A), 70 (classe Especial) e 80 (classe Especial) dBm
Altura da antena receptora	1,5 m

Antena receptora omnidirecional	<p>Diagrama de radiação horizontal</p>  <p>Diagrama de radiação vertical</p> 
Ganho da antena receptora omni	2,15 dBi
Figura de ruído do receptor	10 dB
Piso de ruído	-96,42 dBm
Máscara do filtro de recepção (protótipo da <i>Proeletronic</i>)	
Sensibilidade de recepção	-77,42 dBm
Banda de recepção	5,7 MHz
Critério de interferência C/I,	19 dB, 16 dB, 3 dB e 0 dB

C/N+I, N+I/N e I/N	
Raio de cobertura	10 km e 20 km
Modelo de propagação	ITU-R P. 1546-4 <i>land</i> , cenário urbano
Desvio padrão	5,5 dB

Tabela D.2: Parâmetros de simulação do sistema interferente LTE (OFDMA *uplink*)

Frequência	713 MHz
SINR mínimo	12,2 dB
Subportadoras por BS	24
Número de subportadoras por móvel	12
Perda de acoplamento	70 dB
Largura de banda	10 MHz
Figura de ruído do receptor	9 dB
Largura de banda do <i>Resource Block</i> (RB)	180 kHz
Máscara de transmissão (3GPP)	
Potência de transmissão	14 dBm, 17 dBm, 20 dBm e 23 dBm
Usuários por BS	20
Modelo de propagação do enlace LTE	<i>Extended Hata</i> , cenário urbano
Número de BS's no sistema	3

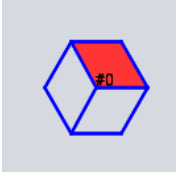
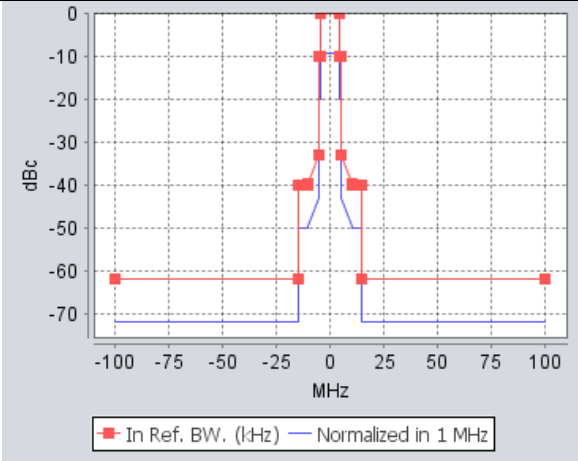
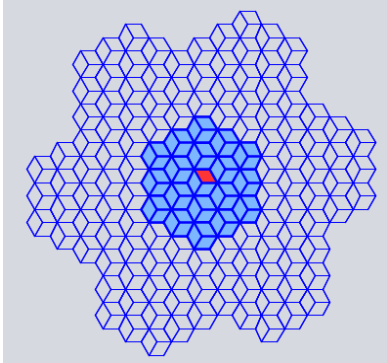
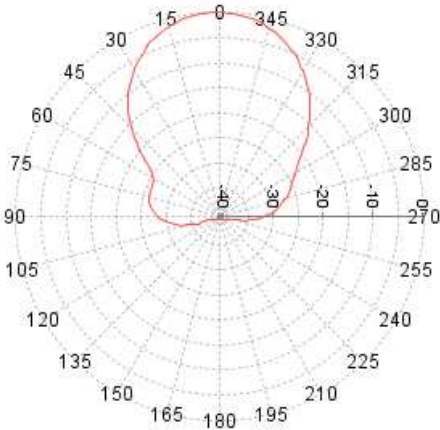
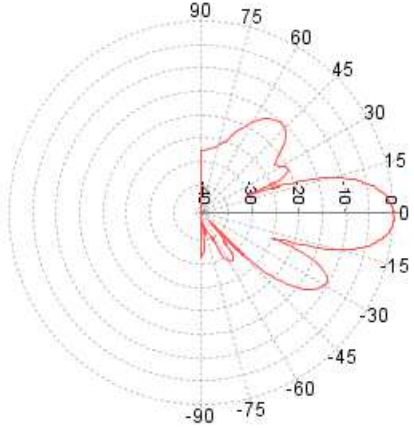
Layout da célula	
Raio da célula	0,25 km
Altura da antena	1 m
Modelo de propagação do enlace U.E. e receptor-vítima	<i>Extended Hata</i> - SRD, cenário urbano

Tabela D.3: Parâmetros de simulação do sistema interferente LTE (OFDMA downlink)

Frequência	768 MHz
Largura de banda	10 MHz
Máscara de transmissão (3GPP)	
Potência de transmissão	40 dBm, 43 dBm e 46 dBm
Número de BS's no sistema	57
Layout da célula	
Raio da célula	1 km e 2 km
Altura da antena	30 m

<p>Antena transmissora da RFS</p>	<p>Diagrama de radiação horizontal</p>  <p>Diagrama de radiação vertical</p> 
<p>Ganho da antena transmissora</p>	<p>14 dBi</p>
<p>Modelo de propagação do enlace <i>eNodeB</i> e receptor-vítima</p>	<p><i>Extended Hata</i></p>

Anexo E – Gráficos da função de distribuição cumulativa e da densidade de probabilidade

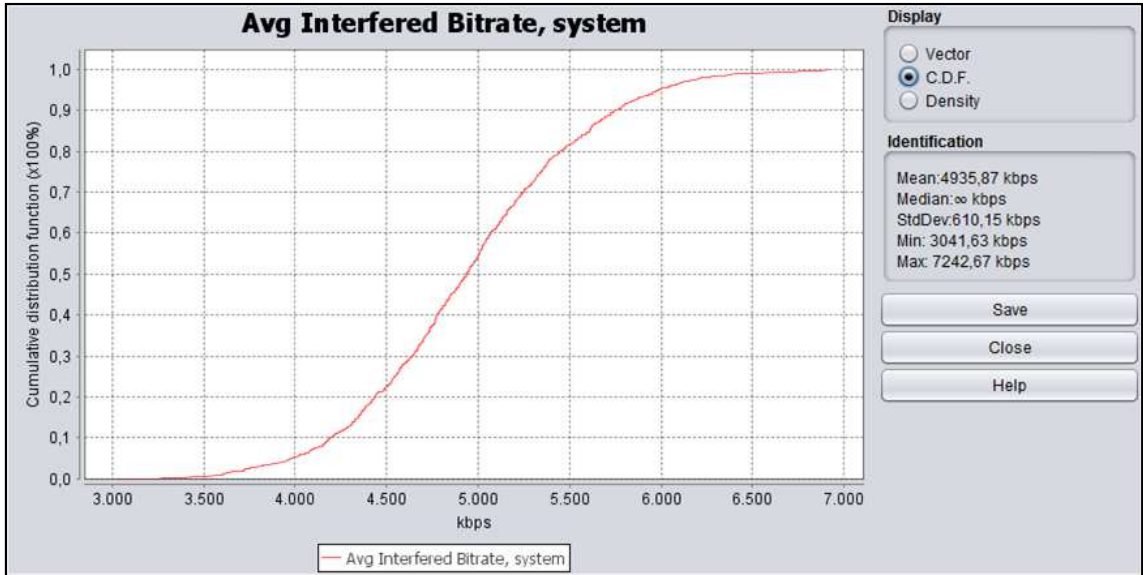


Figura E.1: Resultado da distribuição cumulativa da taxa de bit com interferência

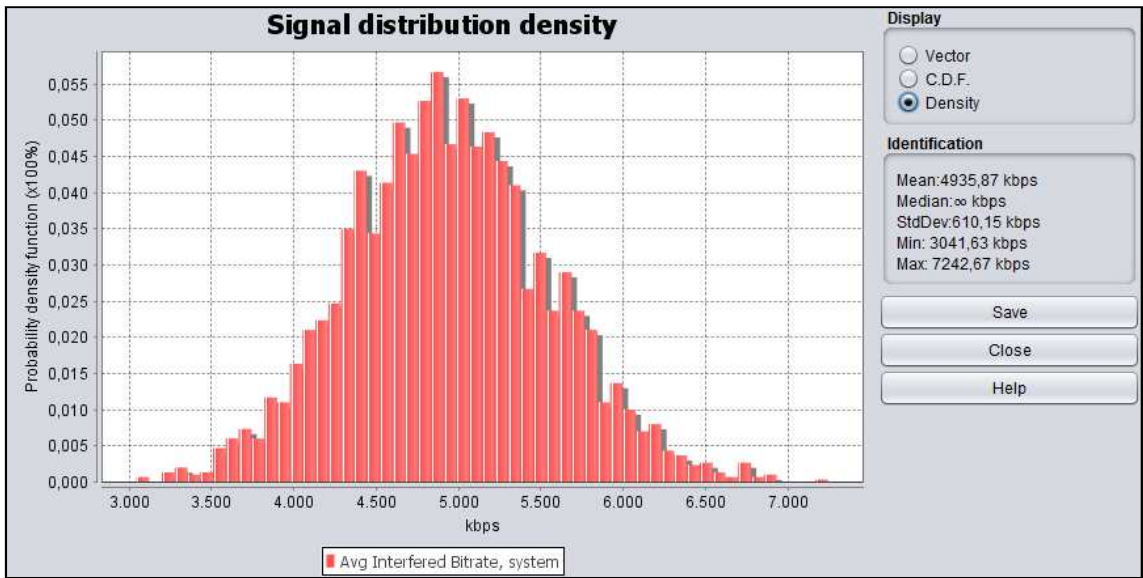


Figura E.2: Resultado da função densidade de probabilidade da taxa de bit com interferência

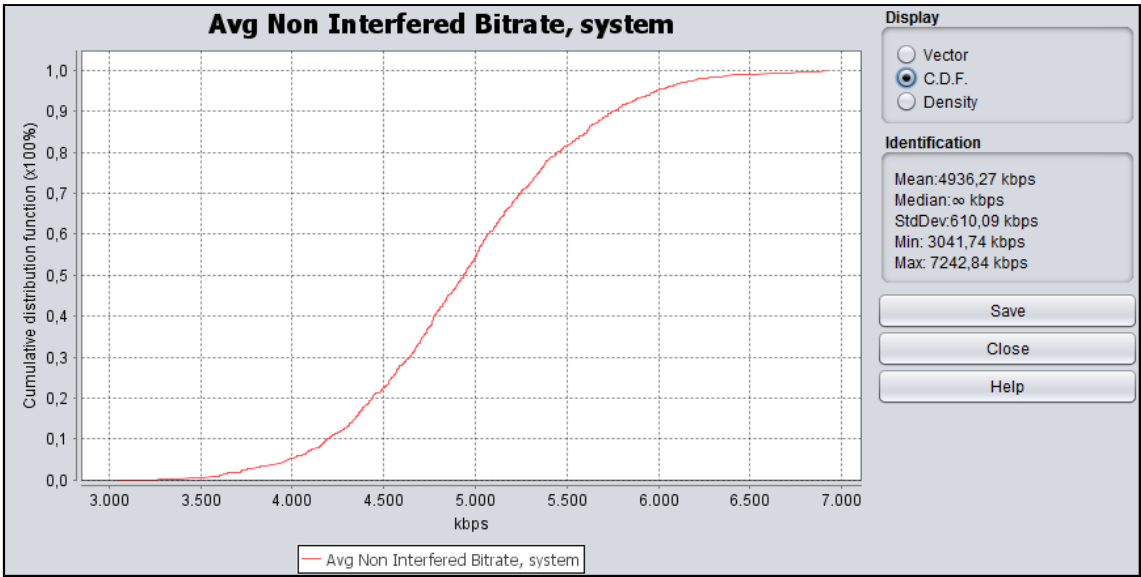


Figura E.3: Resultado da distribuição cumulativa da taxa de bit sem interferência

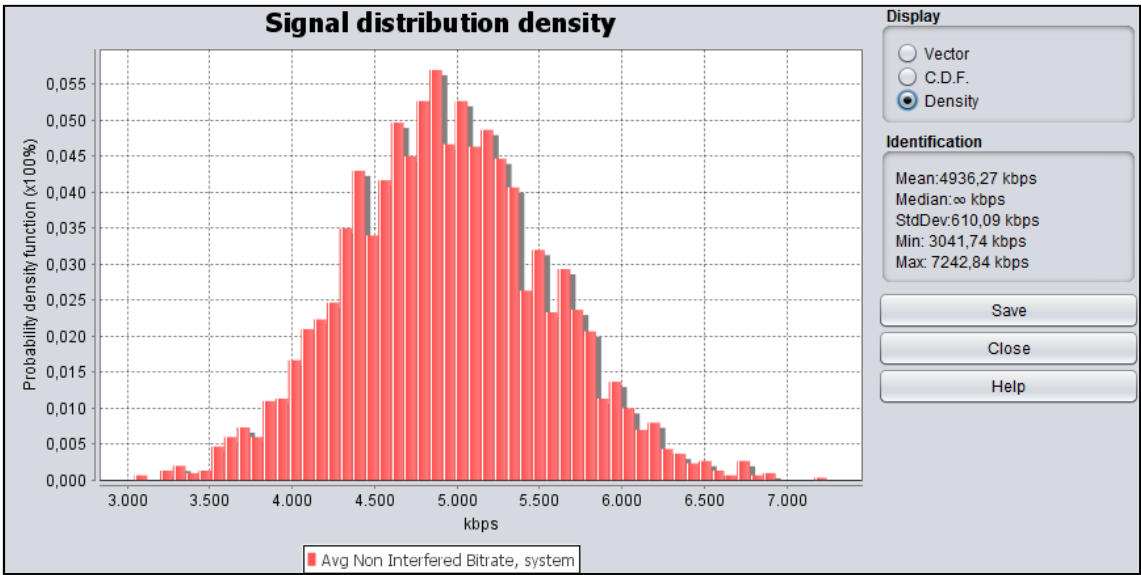


Figura E.4: Resultado da função densidade de probabilidade da taxa de bit sem interferência

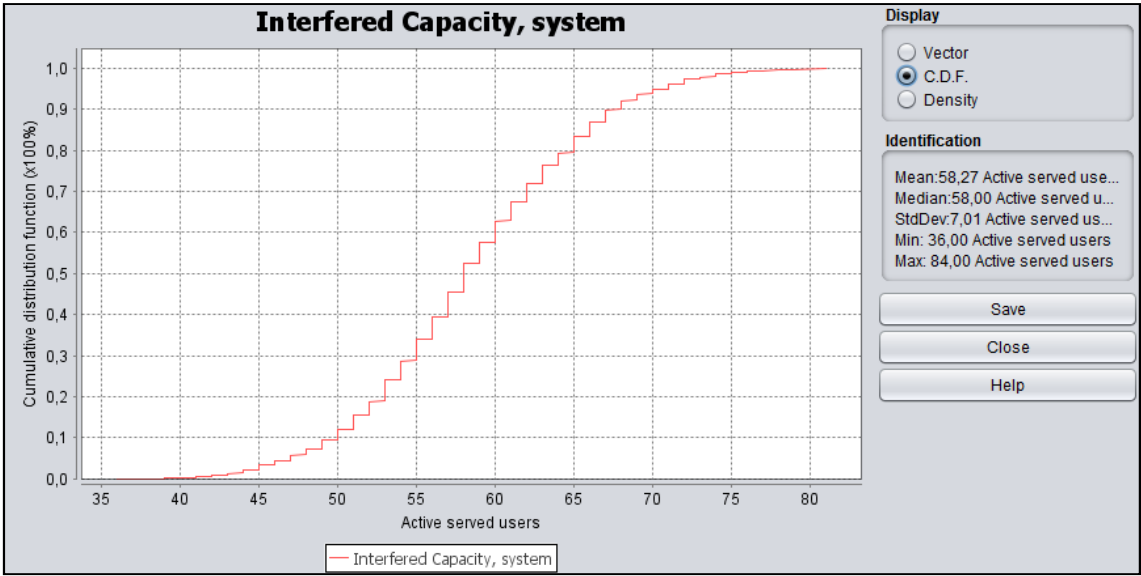


Figura E.5: Resultado da distribuição cumulativa da capacidade com interferência

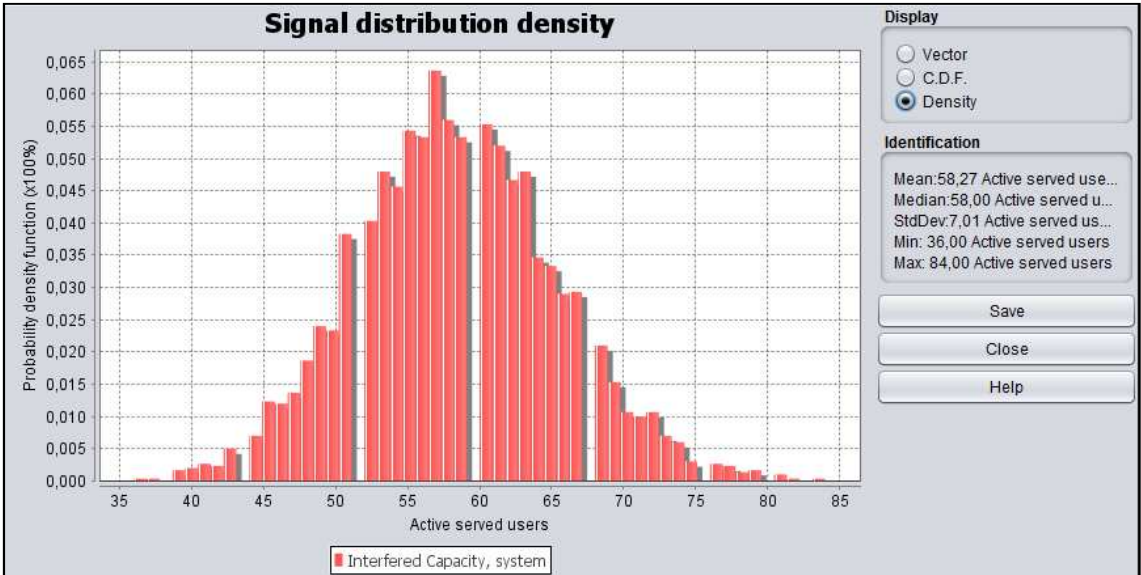


Figura E.6: Resultado da função densidade de probabilidade da capacidade com interferência

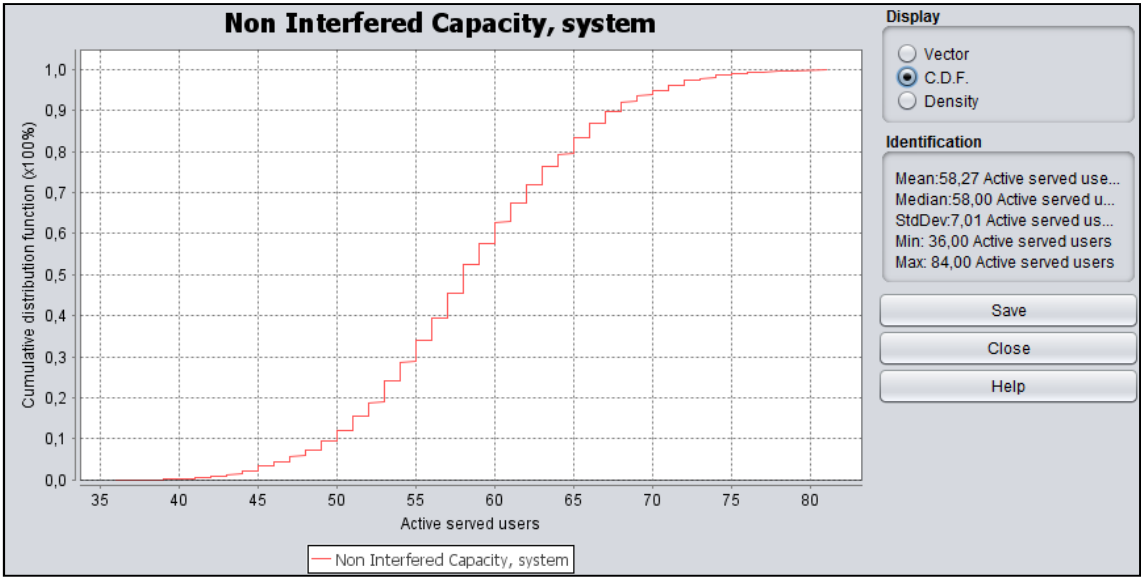


Figura E.7: Resultado da distribuição cumulativa da capacidade sem interferência

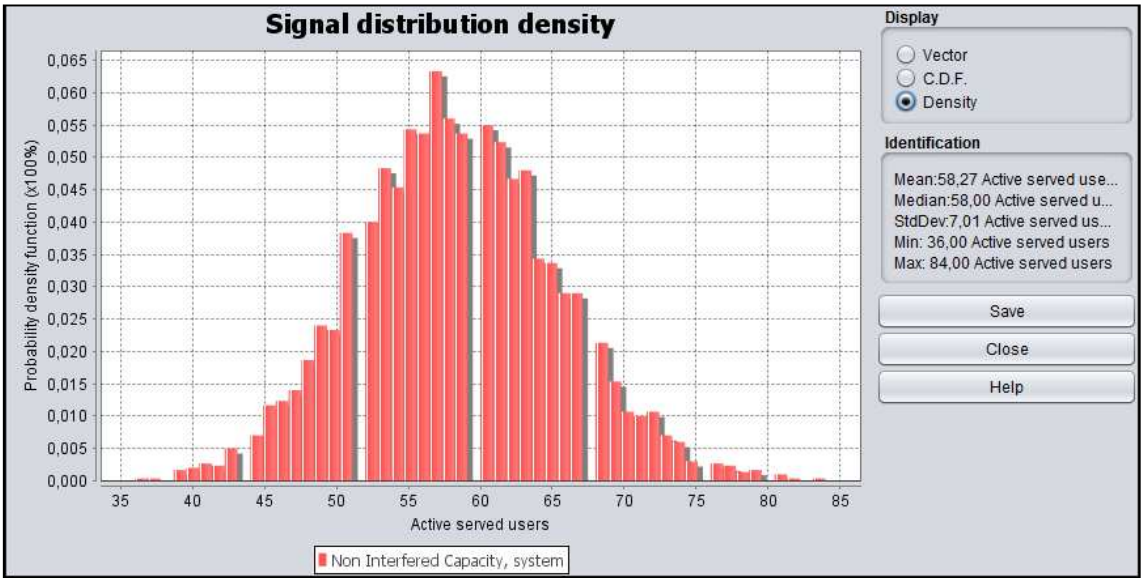


Figura E.8: Resultado da função densidade de probabilidade da capacidade sem interferência

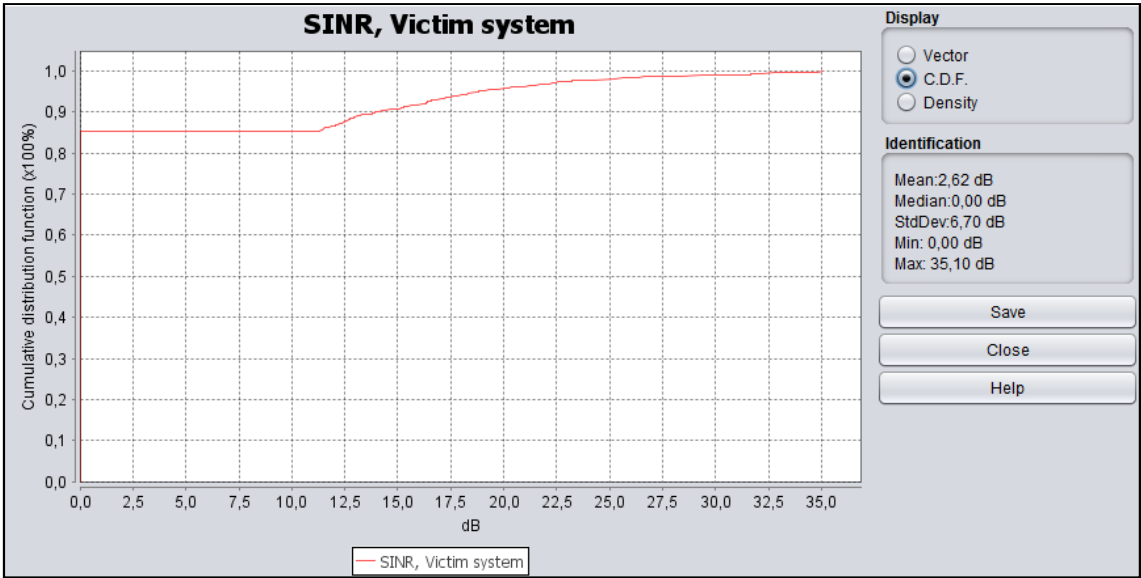


Figura E.9: Resultado da distribuição cumulativa da razão SINR

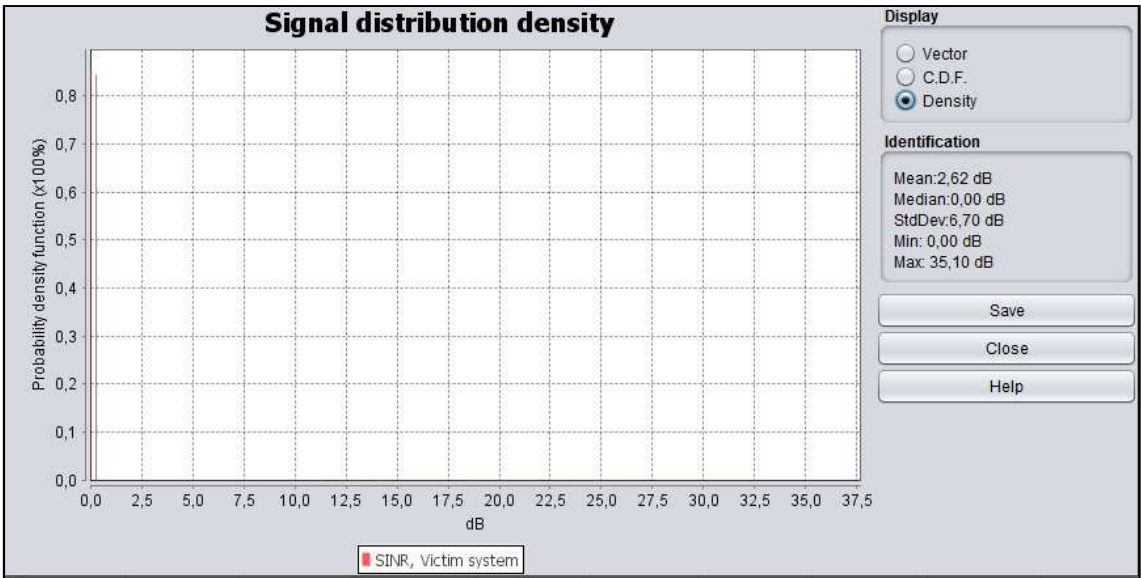


Figura E.10: Resultado da função densidade de probabilidade da razão SINR