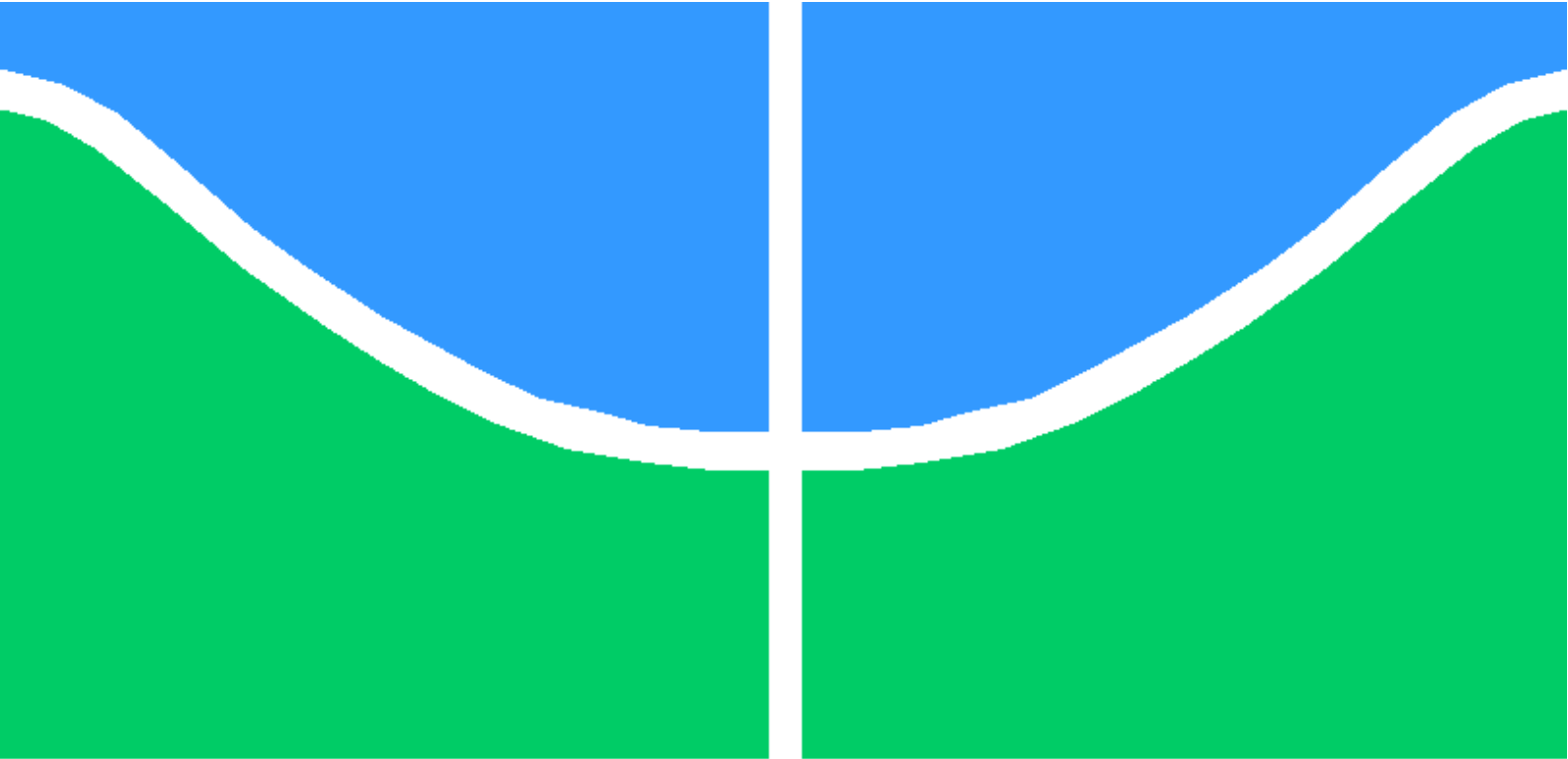




TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**ANÁLISE DE CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS LTE E
TV DIGITAL NA FAIXA DE 700 MHz
E PREDIÇÃO DE COBERTURA LTE NAS FAIXAS
DE 700 MHz E 2500 MHz**

Raquel Mendonça Gonçalves

Brasília, Junho de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DE CONVIVÊNCIA ENTRE SISTEMAS LTE E
TV DIGITAL NA FAIXA DE 700 MHz
E PREDIÇÃO DE COBERTURA LTE NAS FAIXAS
DE 700 MHz E 2500 MHz

Raquel Mendonça Gonçalves

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheira Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Ugo Silva Dias, ENE/UnB
Orientador

Prof. Rafael Timóteo de Sousa Júnior,
ENE/UnB
Examinador interno

Prof. Antônio José Ribeiro, ENE/UnB
Examinador externo

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus e ao propósito de contribuir para uma sociedade melhor.

Raquel Mendonça Gonçalves

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade de passar pelo desafio chamado engenharia, por Ele ter estado comigo em todos os momentos e por Seu amor incondicional. Agradeço aos meus pais e ao meu irmão pelo infinito apoio, incentivo e exemplo de amor ao próximo que tenho todos os dias. Agradeço a todos os parentes e amigos que me acompanham na jornada chamada vida. Agradeço aos meus colegas de curso que compartilharam alegrias e tristezas. Agradeço aos professores por cada ensinamento. Agradeço à CelPlan (CelTec Tecnologia de Telecomunicações e Comércio Ltda) por ceder o programa de predição de cobertura CelPlanner à Universidade de Brasília. Agradeço à Carol da secretaria do departamento de Engenharia Elétrica pelas inúmeras ajudas e conselhos. Agradeço, finalmente, ao Professor Ugo Silva Dias pela paciência em me orientar por dois anos e pelos ensinamentos não só acadêmicos mas de vida. Por fim, agradeço a todos que acreditam nos meus sonhos e me impulsionam, que Deus abençoe a todos.

Raquel Mendonça Gonçalves

RESUMO

O presente trabalho trata do tema da predição de cobertura para a rede 4G LTE nas frequências de 700 MHz e 2500 MHz na região de Brasília. Para tanto, a predição de cobertura foi simulada, por meio do *software* comercial CelPlanner, para as duas frequências, deixando evidente o maior alcance da cobertura em 700 MHz comparado à frequência de 2500 MHz nos mesmos cenários. Além disso, este trabalho estuda o caso de interferência do sinal LTE na recepção de TV Digital, com o objetivo de determinar um meio de mitigar essa interferência. Os resultados mostram o potencial de crescimento das redes LTE na frequência de 700 MHz e, também, a possibilidade da utilização de filtros para mitigar interferências entre o serviço de telefonia móvel e o serviço de TV Digital.

ABSTRACT

This work deals with the coverage prediction theme for the 4G LTE network in the frequencies of 700 MHz and 2500 MHz in Brasilia region. Therefore , the prediction coverage was simulated for both frequencies, using the commercial software CelPlanner, making it clear the greater range of coverage at 700 MHz compared to the frequency of 2500 MHz, in the same scenarios. In addition, this paper studies the case of interference from LTE signal in Digital TV reception, in order to determine a way of mitigating the interference. The results show the growth potential of LTE networks in the frequency of 700 MHz and, also, the possibility of using filters to mitigate interference between the mobile service and Digital TV service.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	3
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	4
2	CONCEITOS BÁSICOS	5
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO LTE	5
2.1.1	INTRODUÇÃO	5
2.1.2	ARQUITETURA DO LTE.....	7
2.1.3	LTE NO BRASIL	8
2.2	CARACTERIZAÇÃO DA TV DIGITAL.....	9
2.2.1	TVD NO BRASIL.....	9
2.2.2	BANDAS DE FREQUÊNCIA	9
2.3	CONVIVÊNCIA LTE E TVD.....	11
2.4	CONCLUSÃO.....	12
3	PLANEJAMENTO DE REDES CELULARES	13
3.1	MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	13
3.1.1	ITU-R P.1812-1	13
3.1.2	ITU-R P.1546-4.....	14
3.2	PROGRAMA CELPLANNER.....	15
3.2.1	PREDIÇÃO DE COBERTURA.....	19
3.2.2	TESTE DE INTERFERÊNCIA.....	26
3.3	CONCLUSÃO.....	32
4	ANÁLISES E RESULTADOS: PREDIÇÃO DE COBERTURA	34
4.1	COBERTURA PARA LTE 700 MHz E 2500 MHz	34
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA	36
4.3	CONCLUSÃO.....	38
5	ANÁLISES E RESULTADOS: INTERFERÊNCIA ENTRE LTE E TVD	39
5.1	TESTES NO CELPLANNER	39
5.1.1	CENÁRIO GERAL.....	40

5.1.2	CENÁRIO DE BORDA	40
5.2	TESTES PRÁTICOS DE INTERFERÊNCIA	41
5.2.1	CENÁRIO DE MEDIÇÃO	41
5.2.2	RESULTADOS	44
5.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	46
5.4	PROPOSTA PARA MITIGAR A INTERFERÊNCIA	47
5.5	CONCLUSÃO.....	48
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução dos acessos do Serviço Móvel Pessoal no Brasil entre 2000 e 2011 [1].	1
1.2	Evolução do acesso a dados no Brasil [1].	2
2.1	MIMO: <i>Multiple Input Multiple Out</i> [8].	6
2.2	Múltiplo acesso do LTE : OFDMA e SC-FDMA [10].	6
2.3	Arquitetura de Rede do LTE [12].	8
2.4	Raios de cobertura e número de Estações Rádio Base para as frequências entre 700 e 5800 MHz [1].	9
2.5	Operação de <i>refarming</i> para o município de Araçatuba, SP [6].	10
3.1	Antena para transmissão LTE.	18
3.2	Antena para transmissão TVD.	19
3.3	Antena para recepção do Assinante.	19
3.4	Configuração da Célula de 700 MHz.	20
3.5	Balanceamento de enlace para 700 MHz.	22
3.6	Configuração da Célula de 2500 MHz.	23
3.7	Balanceamento de enlace para 2500 MHz.	25
3.8	Região de Brasília para Predição de Cobertura.	26
3.9	Cenário Geral de Interferência.	27
3.10	Cenário de Borda de Interferência.	28
3.11	Configuração dos Assinantes.	29
3.12	Configuração da Célula de TVD.	30
3.13	Balanceamento de enlace para a TVD.	32
3.14	Predição de cobertura da TVD.	33
4.1	Predição de cobertura do LTE em 700 MHz.	35
4.2	Predição de cobertura do LTE em 2500 MHz.	36
4.3	Valores de Capex para implantação de infraestrutura de redes de comunicação sem fio para diferentes faixas de frequências [1].	38
5.1	Cenário dos testes práticos de interferência.	41
5.2	Recepção de TVD dos testes práticos de interferência.	42
5.3	Amplificador variável de 20dB para Recepção de TVD.	42
5.4	Analizador de espectro portátil.	43
5.5	Analizador de espectro de bancada.	44

5.6	Convivência TVD x 4G LTE[13]	47
5.7	Exemplo de Filtro Passa Baixa de Frequência de Corte de 692 MHz	48

LISTA DE TABELAS

2.1	Bandas de frequência FDD e TDD do LTE [11].	7
2.2	Cenários de interferência prejudicial do SMP sobre a Radiodifusão [14].	11
2.3	Cenários de interferência prejudicial da Radiodifusão sobre o SMP [14].	12
3.1	ITU-R P.1812-1: lista de parâmetros de entrada e seus limites[16]	14
3.2	ITU-R P.1546-4: lista de parâmetros de entrada e seus limites[16]	15
3.3	Desvanecimento	16
3.4	Configurações Gerais da CPE	16
3.5	Configurações Gerais do terminal	17
3.6	Configurações de Rádio	17
3.7	Parâmetros MIMO	18
4.1	Comparação entre o nível de sinal em 700 MHz e 2500 MHz	37
5.1	Resultado da simulação de interferência no Cenário Geral.	40
5.2	Resultado da simulação de interferência no Cenário de Borda	40
5.3	Características dos Canais de TV	43
5.4	Especificações da antena LTE dos testes de interferência	44
5.5	Resultado final dos testes práticos de interferência para a TV Senado	45
5.6	Resultado final dos testes práticos de interferência para a TV Justiça	45
5.7	Resultados obtidos no teste de <i>downlink</i> , com antenas internas, com TVD operando no canal 51 e LTE com 100% de tráfego de dados. [18]	46

LISTA DE SIGLAS

Siglas

2G	<i>Second Generation</i>
3G	<i>Third Generation</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Fourth Generation</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
eNodeB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ERB	<i>Estação Rádio Base</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSS	<i>Home Subscription Server</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunication</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
ME	<i>Mobile Equipment</i>
MIMO	<i>Multiple Input and Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MT	<i>Mobile Termination</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Resource Function</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PWG	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QCI	<i>QoS Class Identifier</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>

SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TE	<i>Termination Equipment</i>
TVD	<i>Televisão Digital</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Símbolos Gregos

Ω	<i>Segundo Momento</i>
σ	<i>Desvio Padrão</i>
σ^2	<i>Variância</i>
λ	<i>Comprimento de Onda</i>
$\Gamma(.)$	<i>Função Gama</i>

Símbolos Latinos

L_F	<i>Perda no Espaço Livre</i>
P_t	<i>Potência Efetiva Isotrópica Transmitida</i>
P_r	<i>Potência Prevista Isotrópica Recebida</i>
G_a, G_b	<i>Ganhos das Antenas Terminais</i>
r	<i>Distância entre estação rádio base e móvel [m]</i>
f	<i>Frequência da Portadora</i>
c	<i>Constante de Propagação no Espaço Livre</i>
R	<i>Distância entre estação rádio base e móvel [km]</i>
h_b	<i>Altura da antena da estação rádio base em relação solo [m]</i>
h_m	<i>Altura da antena do móvel em relação solo [m]</i>
s	<i>Magnitude da componente LOS</i>
I_0	<i>Função de Bessel</i>
m	<i>Profundidade de Desvanecimento</i>
k	<i>Fator de Rice</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O setor de telecomunicações brasileiro vem experimentando um crescimento vertiginoso desde a década de 1990. Com o constante surgimento de novas tecnologias de comunicação, há o crescimento da demanda de espectro no país [1]. Tais mudanças podem ser exemplificadas pelo início da *internet*, pela privatização do setor de telecomunicações, pela disseminação do serviço móvel pessoal, pela digitalização da TV terrestre, dentre outros [1]. A Figura 1.1 mostra o crescimento exponencial do serviço móvel pessoal (SMP) ao longo dos anos.

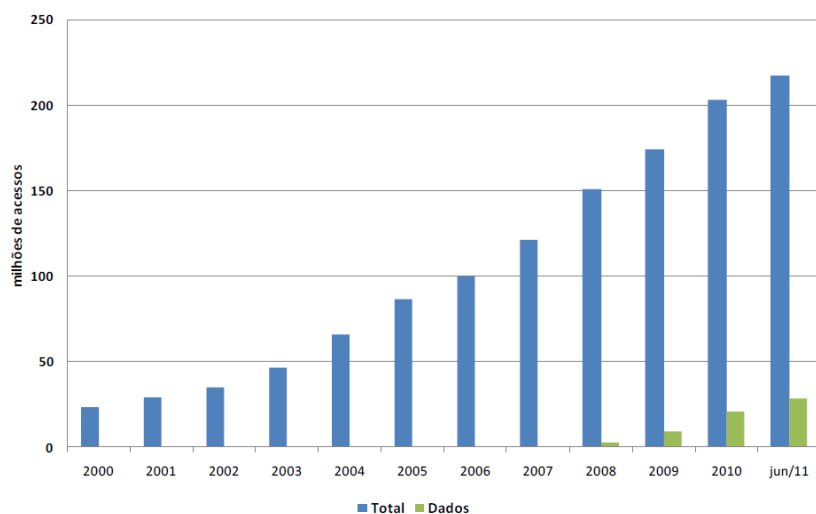


Figura 1.1: Evolução dos acessos do Serviço Móvel Pessoal no Brasil entre 2000 e 2011 [1].

Mesmo antes da década de 1990 o sistema de telecomunicações brasileiro era alvo de diversas modificações. Em 1880 houve a primeira permissão concedida a uma empresa para exploração de serviços de telefonia no Brasil para fins comerciais, mais especificamente na cidade do Rio de Janeiro [2]. Em 1890 foi outorgada a primeira concessão para a primeira linha interurbana do país ser implantada entre Rio de Janeiro e São Paulo [2]. Em 1957 é estabelecida a primeira instalação interurbana com enlaces por micro-ondas no país [2]. Em 1965 foi criada a empresa

de Telecomunicações (Embratel), o que deu início à modernização das telecomunicações no Brasil [2]. Em 1972 foi criada a Telebrás (Telecomunicações Brasileiras S/A), com o papel de gerenciar o desenvolvimento das telecomunicações no país [2]. De 1974 a 1977 os números de telefones públicos e serviços de telefonia cresceu mais que o dobro e os canais de voz instalados triplicaram. Em 1990 iniciou-se a telefonia móvel no país, o Sistema Móvel Celular começou a operar na cidade do Rio de Janeiro, suportando até 10 mil terminais [3].

Atualmente, o sistema de telecomunicações continua crescendo, sendo os sistemas sem fio os que recebem maior foco, já que os sistemas sem fio possibilitam a comunicação mesmo com mobilidade. Mais especificamente, a busca por mobilidade provou não ser a única necessidade das pessoas, a demanda de dados associados à tecnologia celular tem atuado fortemente nas modificações do setor [1]. A Figura 1.2 apresenta o crescimento dos serviços de dados ao longo dos anos, comparando, ainda, os serviços de dados móveis aos serviços de dados fixos [1].

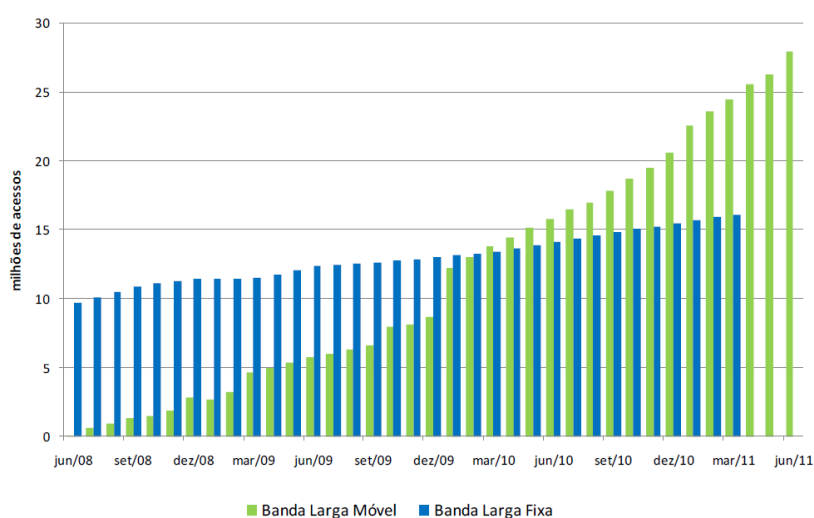


Figura 1.2: Evolução do acesso a dados no Brasil [1].

1.2 Definição do Problema

Como a maioria dos recursos naturais, o espectro eletromagnético é um recurso escasso. Atualmente, o espectro é regulado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), a agência fiscaliza e acompanha o uso de tal recurso para que a alocação de frequências seja feita de maneira eficiente e sustentável.

Frente ao cenário descrito, o Brasil passa por mais uma inovação no Setor de Telecomunicações: a implantação da tecnologia LTE (do inglês *Long Term Evolution*) caracterizando a quarta geração de telefonia celular (4G). Essa geração possui maior foco em serviços de dados associados à mobilidade do que em serviços de voz. Portanto, a alta demanda de capacidade e taxa de dados tem motivado novas adequações no sistema de telecomunicações brasileiro.

Tradicionalmente, o Brasil instalava os novos sistemas móveis com atraso em relação aos países desenvolvidos. Entretanto devido, principalmente, à aproximação da Copa do Mundo e seus

eventos, o LTE veio a ser instalado no Brasil simultaneamente a esses países. Essa implementação se deu para suportar o grande número de turistas que utilizaram os serviços de dados em certas áreas de eventos.

Como o Brasil ainda não finalizou a digitalização de seu sistema de TV, para cumprir tal objetivo, a faixa de frequências de 2500 MHz a 2690 MHz, anteriormente destinada ao MMDs, foi destinada para os celulares 4G pela resolução 544/2010 da ANATEL [4]. Entretanto o uso dessa faixa implica alguns desafios técnicos, que são consequência de uma perda maior de percurso e de penetração devido às altas frequências. Tais desafios aumentam a necessidade de recursos econômicos para implementar o LTE nesta faixa do espectro [5].

Mesmo com o uso da faixa de 2500 MHz, ainda existe uma grande demanda por espectro para o LTE. Dessa forma propõe-se utilizar o espectro de 700 MHz para suprir as necessidades técnicas do 4G com uma melhor relação de custo benefício em relação à faixa de 2500 MHz. Isso será possível em decorrência da digitalização do serviço de TV terrestre que liberará espaço do espectro de frequências. Ao desativar a transmissão analógica de TV, será feita a realocação das frequências da TV Digital para as faixas ocupadas pela TV Analógica [6]. Todavia, essa reorganização ainda carrega a possibilidade de interferência entre os sinais de LTE no início da faixa de 700 MHz com os sinais de TV Digital nas frequências próximas aos 700 MHz.

Considerando tais demandas, é necessário elaborar estudos criteriosos e específicos para atender os casos e cenários brasileiros. Tais estudos devem estar relacionados à análise de convivência entre sistemas que operam na faixa de 700 MHz e à predição de cobertura de sinais sem fio.

1.3 Objetivos do Projeto

O presente projeto tem por objetivo simular, analisar e comparar a cobertura das redes de telefonia móvel de tecnologia LTE nas faixas de 700 MHz e 2500 MHz na cidade de Brasília. Além disso pretende-se investigar a convivência do sistema de telefonia celular LTE em 700 MHz com o sistema de TV Digital no Distrito Federal, bem como possíveis casos de interferência.

Por meio do programa computacional CelPlanner, são realizadas simulações que permitem obter a predição de cobertura e de interferência, quando for o caso, para as Estações Rádio Base (ERB's) nos seguintes cenários:

- Tecnologia LTE na faixa de 700 MHz para ambientes externos e internos na região de Brasília composta pela Asa Sul, Asa Norte e Zona Central;
- Tecnologia LTE na faixa de 2500 MHz para ambientes externos e internos na região de Brasília composta pela Asa Sul, Asa Norte e Zona Central;
- Sinal de TV Digital nas frequências próximas a 700 MHz para a região do Distrito Federal;
- Convivência entre os sinais de LTE e TV Digital na região do Distrito Federal.

Por meio de estruturas de medição montadas em ambiente interno com os equipamentos disponíveis no Laboratório de Estruturas de Microondas e Ondas Milimétricas (LEMOM) é possível:

- Configurar um sistema de sondagem de rádio frequência para estudar os sinais de LTE e TV Digital;
- Verificar, na prática, se há ocorrência de interferência de um sinal LTE na recepção do sinal de TV Digital.

1.4 Apresentação do manuscrito

O Capítulo 2 traz os conceitos básicos necessários para entendimento e execução deste projeto. Será discutido sobre a tecnologia LTE, suas características, arquitetura e bandas de frequência; sobre a digitalização da TV; e sobre as características do sistema de TV Digital.

O Capítulo 3 discorre sobre o CelPlanner, programa computacional para predição de redes sem fio. Expondo as configurações utilizadas neste projeto bem como os parâmetros e modelos de predição utilizados pelo programa para as simulações realizadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e análises das predições de cobertura realizadas para a cidade de Brasília. Além disso é realizada uma comparação entre as faixas de frequência destinadas para a Quarta Geração de celulares (700 MHz e 2500 MHz).

O Capítulo 5 traz o estudo de convivência e interferência entre os sistemas de telefonia celular LTE e TV Digital, considerando tanto os resultados das simulações quanto os resultados das medições práticas.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do presente trabalho e sugere possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

2.1 Caracterização do LTE

2.1.1 Introdução

A UIT (União Internacional de Telecomunicações) desenvolve padrões para as telecomunicações móveis, os sistemas IMT (sistemas Internacionais de Telecomunicações Móveis), de tal forma que as gerações (2G, 3G, 4G) denominadas pela indústria e mercado têm por base esses padrões globais de comunicação [7]. A geração mais recente de padrões desenvolvida pela UIT são os sistemas IMT *Advanced*, que tem recebido o título de Quarta Geração [7]. Tais sistemas incluem novas capacidades, maior número de serviços suportados pelas redes e altas taxas de dados, sendo os alvos: 100 Mbps de taxa no enlace direto em movimento (carro) e 1 Gbps em situação estacionária [7]. A tecnologia LTE foi designada para atingir os parâmetros especificados pela UIT, e é padronizado pelo 3GPP de forma a aumentar a capacidade da tecnologia [8].

Atualmente, o LTE permite uma taxa para enlace direto de 300 Mbps, e para o enlace reverso uma taxa de 75 Mbps, ou seja, a versão do LTE de hoje ainda não atinge os padrões esperados para o IMT *Advanced*. Entretanto o sistema chamado LTE-*Advanced* tem por foco maiores taxas de bits, com eficiência para atingir os requerimentos dos sistemas IMT *Advanced* referidos como 4G. Para a versão avançada do LTE é esperada uma taxa para enlace direto de 3 Gbps e para enlace reverso de 1,5 Gbps [8].

Uma das características do LTE é a possibilidade de ter sua Duplexação por Divisão em Frequência (FDD, do inglês *Frequency Division Duplex*) ou por Divisão no Tempo (TDD, do inglês *Time Division Duplex*). Além disso, o LTE faz uso da técnica MIMO (do inglês *Multiple Input Multiple Out*) para combinar antenas. Tal combinação, exemplificada na Figura 2.1, aumenta a taxa de dados e a cobertura do sinal [8].

A técnica MIMO é usada para aumentar a taxa de bits durante o tráfego de dois (ou mais) conjunto de dados diferentes em duas (ou mais) antenas que utilizam os mesmos recursos nas mesmas frequências e ao mesmo tempo, separadas somente por sinais de referência diferentes[8]. A transmissão será recebida por duas ou mais antenas [8].

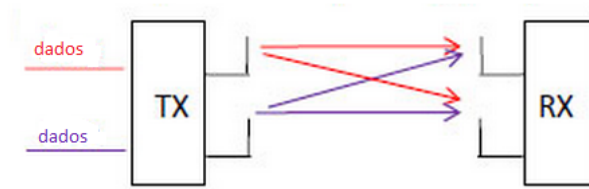


Figura 2.1: MIMO: *Multiple Input Multiple Out* [8].

Outra técnica utilizada no LTE é o múltiplo acesso por meio do OFDMA (do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) no enlace direto, e no enlace reverso utiliza-se o SC-FDMA (do inglês *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*). A tecnologia de múltiplo acesso do enlace direto, representada na Figura 2.2 divide as frequências ortogonalmente, o que reduz a interferência e aumenta a capacidade da rede [9].

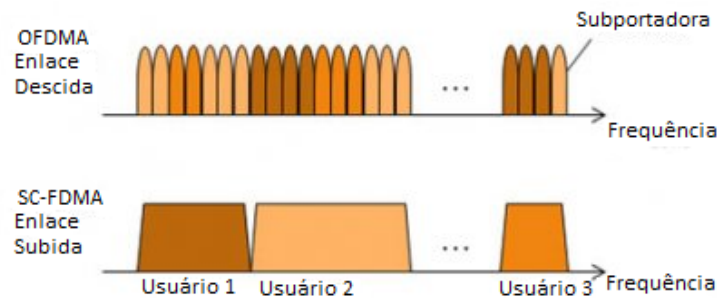


Figura 2.2: Múltiplo acesso do LTE : OFDMA e SC-FDMA [10].

Além disso, o LTE permite a utilização de uma variedade de frequências e a largura de banda pode assumir diferentes valores. O 3GPP padronizou as bandas de frequência de tal forma que a tecnologia pudesse ser desenvolvida em todo o mundo [11]. Essas bandas são divididas em FDD e TDD [11]. O 3GPP também padronizou as larguras de banda que podem ser usadas em cada faixa de frequência, essa padronização pode ser vista na Tabela 2.1 [11].

Resumindo, o LTE, baseado em OFDMA combinado com modulação de ordem superior (até 64QAM), larguras de banda maiores (até 20 MHz) e multiplexação espacial no enlace direto (até 4x4), atinge maiores taxas de dados [10]. O maior pico teórico de taxa de dados no canal é de 75 Mbps no enlace reverso e 300 Mbps no enlace direto [10].

Tabela 2.1: Bandas de frequência FDD e TDD do LTE [11].

Enlace Direto (MHz)		Faixa de Freq.		Enlace Reverso (MHz)		Faixa de Freq.		Duplex	Largura de Banda (MHz)						Áreas de uso
De	Até	De	Até	De	Até	De	Até		1.4	3	5	10	15	20	
1	2110	2170	0-599	1920	1980	18000-18599		FDD			Y	Y	Y	Y	UMTS
2	1930	1990	600-1199	1850	1910	18600-19199		FDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Americas
3	1805	1880	1200-1949	1710	1785	19200-19949		FDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	GSM1800
4	2110	2155	1950-2399	1710	1755	19950-20399		FDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Americas
5	869	894	2400-2649	824	849	20400-20649		FDD	Y	Y	Y	Y			Americas
6	875	885	2650-2749	830	840	20650-20749		FDD			Y	Y			Japan and Australia
7	2620	2690	2750-3449	2500	2570	20750-21449		FDD			Y	Y			UMTS
8	925	960	3450-3799	880	915	21450-21799		FDD	Y	Y	Y	Y			GSM900
9	1845	1880	3800-4249	1750	1785	21800-22149		FDD			Y	Y	Y	Y	Japan and Australia
10	2120	2170	4250-4749	1710	1770	22150-22749		FDD			Y	Y	Y	Y	Americas
11	1476	1501	4750-4949	1428	1453	22750-22949		FDD			Y	Y			Japan and Australia
12	728	746	5000-5179	698	716	2300-23179		FDD	Y	Y	Y	Y			USA
13	746	756	5180-5279	777	787	23180-23279		FDD			Y	Y			USA
14	758	768	5280-5379	788	798	23280-23379		FDD			Y	Y			USA
17	734	746	5730-5849	704	716	23730-23849		FDD			Y	Y			USA
33	1900	1920	36000-36199	1900	1920	36000-36199		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	UMTS
34	2010	2025	36200-36349	2010	2025	36200-36349		TDD	Y	Y	Y	Y	Y		UMTS
35	1850	1910	36350-36949	1850	1910	36350-36949		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Americas
36	1930	1990	36950-37549	1930	1990	36950-37549		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Americas
37	1910	1930	37550-37749	1910	1930	37550-37749		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Americas
38	2570	2620	37750-38249	2570	2620	37750-38249		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	UMTS
39	1880	1920	38250-38649	1880	1920	38250-38649		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	China
40	2300	2400	38650-39649	2300	2400	38650-39649		TDD	Y	Y	Y	Y	Y	Y	China

2.1.2 Arquitetura do LTE

O LTE ou a E-UTRAN (do inglês *Evolved Universal Terrestrial Access Network*), introduzida no 3GPP R8, é o acesso que faz parte do EPS (do inglês *Evolved Packet System*) [10]. O EPS é todo baseado em IP, ou seja, tanto o serviço em tempo real quanto os serviços de transferência de dados são levados pelo protocolo IP [10].

A rede de acesso do LTE é, basicamente, uma rede de Estações Rádio Base [10]. A arquitetura do LTE que pode ser vista na Figura 2.3.

As principais funções dos componentes desta arquitetura são:

- **eNodeB**: É equivalente à Estação Rádio Base (ERB) e executa as funções da E-UTRAN, as eNodeBs são interconectadas entre si de tal forma que possam trocar as informações diretamente[11];
- **MME (Entidade de Gerenciamento de Mobilidade)**: Processa os sinais entre o equipamento do usuário e a rede central [11];
- **S-GW (Gateway de Serviço)**: O S-GW serve como a âncora móvel local para os dados quando há a troca de registro do equipamento do usuário de uma ERB para outra (*handover*) [11];
- **P-GW (Gateway de Pacote de Dados)**: uma de suas funções é ser roteador de borda entre o núcleo e as redes de pacotes externas. Além disso, atua na mobilidade entre tecnologias 3GPP e tecnologias não-3GPP [11];

- **PCRF (Função de Política e Carregamento de Recursos):** Esta função é responsável pela determinação de políticas de controle [11];
- **HSS (Servidor de Assinatura Local):** O HSS é um banco de dados com as informações dos usuários como a identidade e a localização [11].

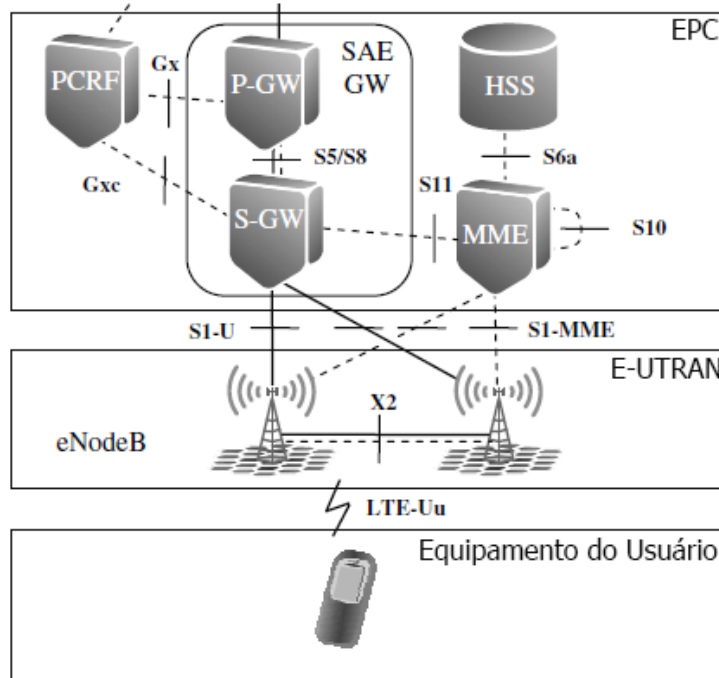


Figura 2.3: Arquitetura de Rede do LTE [12].

2.1.3 LTE no Brasil

A implementação do LTE no Brasil se deu, primeiramente, na frequência de 2500 MHz, considerando a conveniência de estabelecer ambiente que propicie a realização de novos investimentos, incrementalmente a competição e a diversidade de serviços, face à atratividade da faixa de radiofrequências de 2.500 MHz a 2.690 MHz [4].

Após a digitalização da transmissão de TV, com a realocação dos canais de TV no espectro de frequências após o desligamento das transmissões, analógicas vai ser possível utilizar a banda de 700 MHz para o serviço móvel pessoal de tecnologia LTE. Dessa forma, a ANATEL fez um estudo técnico referente à banda de 700 MHz. O foco deste estudo é a interferência e convivência entre o sistema LTE na faixa de 700 MHz e os canais de TV Digital próximos à esta faixa, após o estudo a ANATEL promoveu o leilão da faixa. Tal estudo será melhor explorado no capítulo 5 deste trabalho.

Por fim, o LTE está sendo implementado no Brasil nas frequências de 700 MHz e 2500 MHz. Vale ressaltar que a frequência de 700 MHz se mostrou vantajosa em relação ao alcance do sinal e ao número de ERB's necessário à sua implementação, como pode ser visto na Figura 2.4.

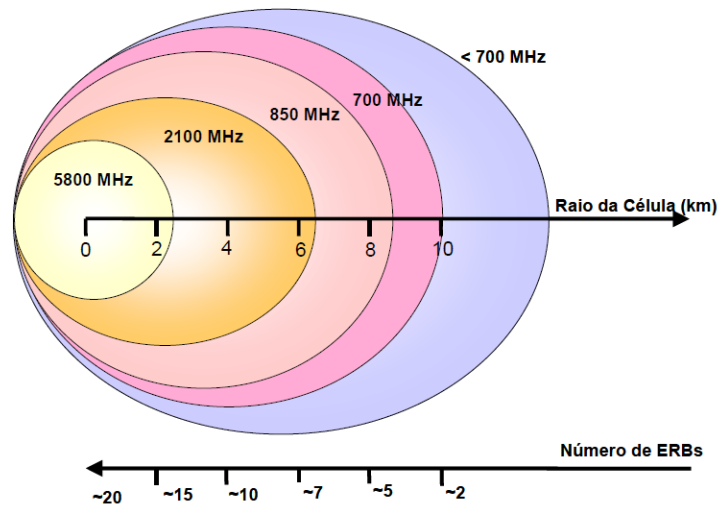


Figura 2.4: Raios de cobertura e número de Estações Rádio Base para as frequências entre 700 e 5800 MHz [1].

2.2 Caracterização da TV Digital

2.2.1 TVD no Brasil

Os serviços de comunicação de massa representam o meio mais difundido de acesso à informação, cultura e entretenimento da população brasileira [1]. Isso se deve à alta taxa de penetração dos aparelhos de televisão nos domicílios em todo o país, e à maior quantidade de municípios rurais com energia elétrica [1].

Um sistema de televisão é composto por três componentes: o estúdio, compreendendo as atividades de produção, pós produção, armazenamento dos vídeos, entre outras; a transmissão dessas informações para o telespectador, que é conhecida como radiodifusão (*broadcast*); e um sistema de recepção (antena, acessórios e televisor) [1]. A introdução da tecnologia digital no serviço de televisão, chamado de televisão digital na última década, refere-se à digitalização do elo faltante: a etapa de radiodifusão [1].

A tecnologia da TV Digital permite que novas funcionalidades sejam incorporadas ao serviço: digitalização das imagens no formato da antiga TV analógica (4x3) com a mesma resolução (número de linhas verticais), o formato *widescreen* (16x9), a alta definição (HDTV, *High Definition Television*), som *surround*, interatividade e recepção móvel [1].

2.2.2 Bandas de Frequência

O espectro de radiodifusão no Brasil é explorado em conformidade com os regulamentos, autorizações para uso de radiofrequências e planos de canalização elaborados, mantidos e atualizados pela ANATEL [1].

Atualmente há a transmissão simultânea dos canais no modo analógico e digital, quando a

transmissão analógica for desligada haverá o remanejamento das emissoras que transmitem suas programações em canais na faixa de 700 MHz para outros canais (de frequências inferiores) no restante do espectro atual da radiodifusão [6]. Tal remanejamento é chamado de *refarming* [6].

“Dividendo Digital” é a expressão utilizada para designar as bandas de frequência que são utilizadas pela TV terrestre analógica e que foram ou serão liberadas a partir da digitalização das transmissões da TV aberta na faixa de frequência de 700 MHz[1].

A operação de *refarming* está exemplificada nas Figura 2.5 para o município de Araçatuba no estado de São Paulo [6].

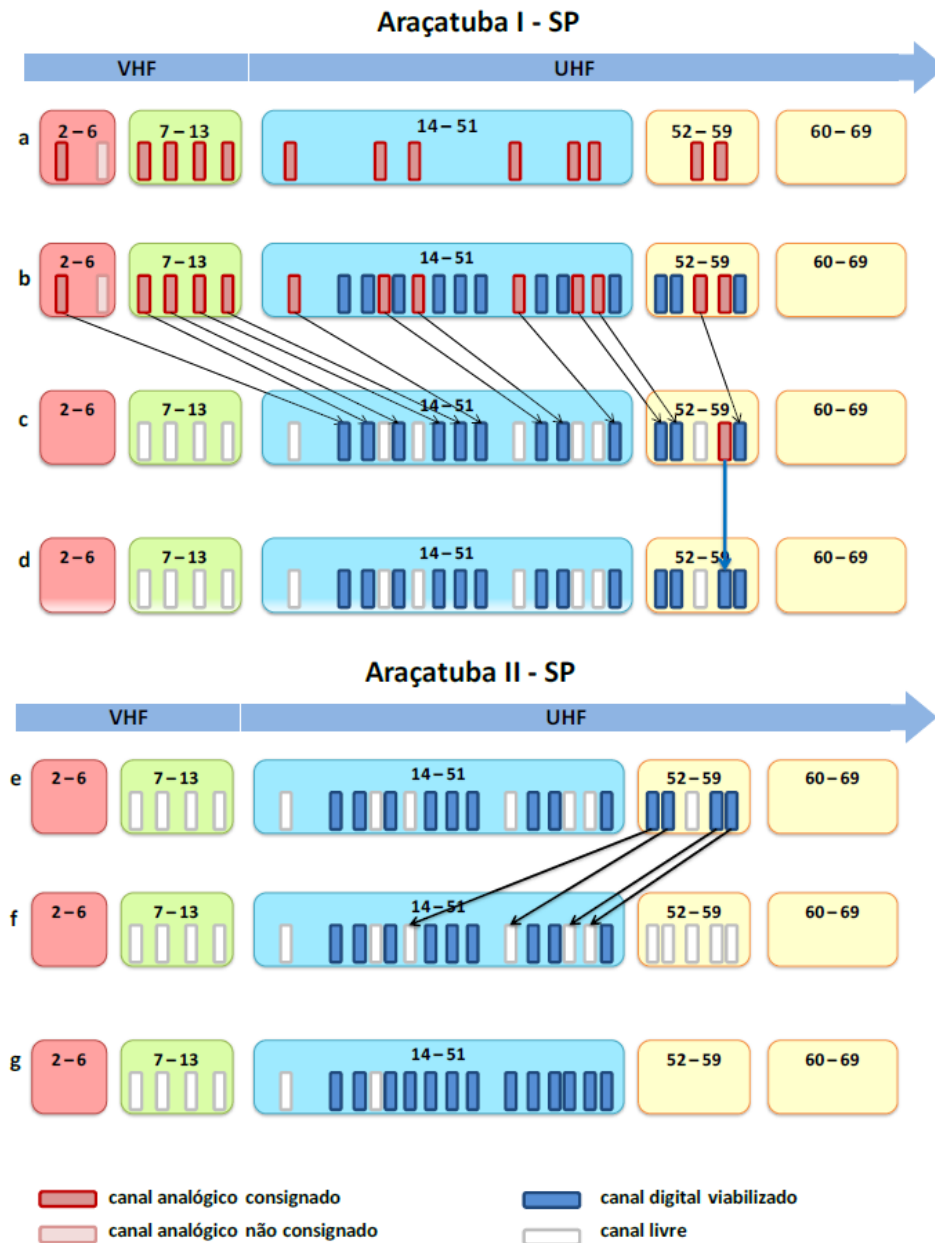


Figura 2.5: Operação de *refarming* para o município de Araçatuba,SP [6].

2.3 Convivência LTE e TVD

A possível utilização do dividendo digital para o serviço móvel pessoal com a tecnologia LTE, gerou a necessidade de um estudo de interferência entre os sinais de TVD e os sinais de LTE. Dessa forma a ANATEL promoveu testes de campo provocando estas interferências intencionalmente; de tal forma que não representam a situação normal de convivência entre os sistemas [13].

Segundo a ANATEL para a maior parte do espectro de televisão, a presença dos sinais do 4G LTE na subfaixa de 700 MHz será absolutamente irrelevante. São apenas alguns canais, em especial o canal 51, adjacente à banda de guarda, que podem vir a sofrer eventuais interferências prejudiciais, e ainda assim em situações muito peculiares, nas quais a relação de proteção não esteja sendo mantida [13]. O mesmo vale para a interferência sobre as estações móveis e terminais LTE causadas pelo SBTVD, que requerem uma conjunção de vários fatores e, provavelmente, será bastante incomum [13].

Os cenários de Interferência prejudicial do SMP (Serviço Móvel Pessoal) sobre a Radiodifusão são descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Cenários de interferência prejudicial do SMP sobre a Radiodifusão [14].

Direção da Interferência Prejudicial	Causador da Interferência Prejudicial	Vítima da Interferência Prejudicial	Espécie da Interferência Prejudicial
SMP sobre Radiodifusão	ERB	TV com antena externa	Saturação do receptor
			Emissões indesejáveis
			Comportamento do CAG
			Frequência Imagem
		TV com antena interna	Saturação do receptor
			Emissões indesejáveis
			Comportamento do CAG
			Frequência Imagem
		TV com antena coletiva com amplificador	Saturação do receptor
			Emissões indesejáveis
			Comportamento do CAG
			Frequência Imagem
		Terminais móveis (<i>one-seg</i>)	
	Terminais SMP	TV com antena externa	
		TV com antena interna	
		TV com antena coletiva com amplificador	
		Terminais móveis (<i>one-seg</i>)	

O cenário de interferência prejudicial da Radiodifusão sobre o SMP é descrito na Tabela 2.3.

No estudo da ANATEL, para cada um desses cenários, são apresentadas as técnicas de mitigação adequadas a aquele cenário específico [14]. As técnicas de mitigação consideradas foram: utilização

Tabela 2.3: Cenários de interferência prejudicial da Radiodifusão sobre o SMP [14].

Direção da Interferência Prejudicial	Causador da Interferência Prejudicial	Vítima da Interferência Prejudicial	Espécie da Interferência Prejudicial
Radiodifusão sobre SMP	Estações SBTVD	ERB	Saturação do receptor
			Emissões indesejáveis
		Terminais SMP	Saturação do receptor
			Emissões indesejáveis

de filtro na saída do transmissor da ERB; utilização de filtro na entrada do receptor de TV ou na entrada do amplificador do sinal de antena; alteração na posição ou troca da antena de recepção de TV; alteração na posição ou característica da antena de transmissão da ERB; redução da potência de transmissão da ERB; aumento na distância entre o terminal e o receptor de TV [14].

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos necessários para a realização das simulações e testes de campos necessários a este trabalho. No próximo capítulo serão abordados as características e configurações referentes ao *software* CelPlanner.

Capítulo 3

Planejamento de Redes Celulares

Para a realização de um planejamento de rede, predição de cobertura e estudo de interferência é necessário determinar e analisar os seguintes aspectos: perda por propagação, localização das Estações Rádio Base, modelo de antena, área de interesse, parâmetros de transmissão e recepção (potência, perda em cabos e conectores), entre outros.

3.1 Modelos de Propagação

De início os sistemas teóricos ou simplificados calculam as perdas por propagação por meio do modelo de espaço livre. A partir da fórmula de Friis é possível obter Equação 3.1 que representa a perda no espaço livre [15]

$$L_F = \frac{PG_aG_b}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad (3.1)$$

Os termos d , f e c representam, respectivamente, a distância entre o transmissor e receptor, a frequência da portadora e a velocidade da luz.

No decorrer dos anos, foi observado que em sistemas mais complexos é necessário o uso de modelos de propagação mais completos. Dessa forma foram desenvolvidos modelos empíricos por meio de medidas de campo em diferentes cenários, para se aproximar mais o modelo das medidas obtidas. Para este trabalho foram utilizados, a fim de configuração do CelPlanner, modelos disponíveis no próprio *software*. Para as simulações referentes ao sinal LTE foi utilizado o modelo ITU-R P.1812-1 e para as simulações referentes à TVD foi utilizado o modelo ITU-R P.1546-4 [16]. A escolha destes modelos foi devido a um resultado mais próximo da realidade, e tais modelos são disponibilizados pela ITU.

3.1.1 ITU-R P.1812-1

Esta recomendação descreve um método de predição de propagação próprio para serviços terrestres ponto-a-área na faixa de frequências de 30 MHz a 3 GHz [16]. Tal método é útil para a

avaliação detalhada dos níveis de sinal excedidos para uma determinada porcentagem de tempo, $p\%$, na faixa de $1\% \leq p \leq 50\%$ e uma determinada porcentagem de locais, PL , na faixa de $1\% \leq pL \leq 99\%$ [16]. Vale ressaltar que esta recomendação é complementar à ITU-R P.1546, descrita na próxima seção.

O método é adequado para predições de sistemas de radiocomunicação que utilizam circuitos terrestres com raios de distância de 0.25 km até cerca de 3000 km, com ambos os terminais de altura até 3 km acima do solo [16]. Este modelo não é adequado para predições de enlaces ar-terra ou Espaço-Terra [16].

O método é descrito, primeiramente, em termos de cálculos de perda de transmissão (dB) não excedente para $p\%$ do tempo na média dos locais [16]. Os elementos de variabilidade local e penetração em construções são, então, caracterizados estatisticamente em relação a locais do receptor. Um procedimento é realizado para converter a intensidade do campo elétrico em uma potência eficaz em watts. Os parâmetros básicos de entrada estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: ITU-R P.1812-1: lista de parâmetros de entrada e seus limites[16]

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Descrição
f	GHz	0.03	3.0	Frequência
p	%	1.0	50.0	% do ano médio na qual o nível de sinal calculado é excedido
p_L	%	1	99	% de locais na qual o nível de sinal calculado é excedido
φ_t, φ_r	graus	-80	80	Latitude do transmissor, receptor
ψ_t, ψ_r	graus	-180.0	180.0	Longitude do transmissor, receptor (positivo = Leste de Greenwich)
h_{tg}, h_{rg}	m	1	3000	Altura da antena acima do solo

3.1.2 ITU-R P.1546-4

Esta recomendação descreve um método para predições de propagação de radiofrequências ponto-a-área para os serviços terrestres na faixa de frequências de 30 MHz a 3000 MHz [16]. Esse método é destinado ao uso em circuitos de raio de distância entre 1 e 1000 km de comprimento e a alturas de antena transmissora inferiores a 3000 m [16]. O método é baseado na interpolação/extrapolação a partir de curvas de campo de força empiricamente derivados, como funções de distância, altura da antena, frequência e tempo de porcentagem [16].

Este método segue um passo a passo de implementação que leva em consideração a correção e o ajuste de parâmetros de acordo com as características do cenário desejado, dessa forma as equações de interpolação variam de acordo com as correções dos parâmetros. O programa CelPlanner já realiza todo o processo automaticamente, incluindo as correções. Vale ressaltar que o método pode também ser aplicado aos valores obtidos a partir das curvas empíricas do campo de força [16]. A Tabela 3.2 contém uma lista de alguns parâmetros de entrada (e os seus limites) que servem como base para derivar os valores da intensidade de campo.

Tabela 3.2: ITU-R P.1546-4: lista de parâmetros de entrada e seus limites[16]

Parâmetro	Unidade	Definição	Limites
f	MHz	Frequência de Operação	30 - 3000 MHz
d	km	Raio de distância	1 - 1000 km
p	%	Tempo de porcentagem	1 - 50%
h_1	m	Altura da antena de transmissão como referenciada	Terrestre: até 3000 m Mar: 1 - 3000 m
h_b	m	Altura da antena acima da altura do terreno	Sem limite: porém só se utiliza esse parâmetro para $d < 15$ km
h_z	m	Altura acima do solo da antena de recepção	Terrestre: 1 - 3000 m Mar: 3 - 3000 m
R	m	Altura representativa da desordem ao redor do receptor	Sem limite
q_{tot}	graus	Ângulo de desobstrução do terreno	0.55 - 40°
q_{eff} , q_{eff1} , q_{eff2}	graus	Ângulos efetivos de desobstrução do terreno do Transmissor.	Deve ser positivo

3.2 Programa CelPlanner

O CelPlanner é uma ferramenta de planejamento de sistema sem fio que possibilita o estudo e projeto de sistemas em toda a faixa comercial de frequências, essa ferramenta é um produto da empresa CelPlan (CelTec Tecnologia de Telecomunicações e Comércio Ltda) cedido à Universidade de Brasília para fins educacionais.

O programa computacional CelPlanner foi utilizado para obter a predição de cobertura do sinal LTE em 700 MHz e 2500 MHz e, também, o estudo de interferência entre o sinal LTE em 700 MHz e o sinal de TV Digital.

O *software* já traz consigo um pacote com os dados morfológicos e topográficos da região do Distrito Federal, entretanto é necessário inserir os parâmetros de interesse para montar o cenário a ser estudado. Os principais parâmetros estão especificados nas Tabelas 3.3 a 3.7, tais valores foram utilizados para construir os cenários de todas as simulações realizadas. Pode-se citar mais os seguintes parâmetros gerais:

- Fator raio de curvatura da terra no valor de 1.333, geralmente utilizado nas predições;
- Distribuição Gaussiana para cálculo da atenuação (corpo humano e penetração em edifícios);
- Fator de atenuação média igual a 3 para o corpo humano e igual a 0 para penetração;
- Fator de desvio padrão igual 2 para o corpo humano e igual a 1 para penetração;
- Taxa de precipitação pontual de 100 mm/h;

- Disponibilidade de serviço requerida igual a 99,90%;

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de desvanecimento, ou seja, as variações no sinal provocadas por reflexões ao longo do percurso.

Tabela 3.3: Desvanecimento

Desvanecimento	
Fator de atenuação de área	35dB/Dec
Probabilidade de cobertura	90%
Universo da probabilidade	Edge
Fator de correlação intracélula	0,9
Fator de correlação intercélula	0,3
Desvanecimento por sombreamento	
Distribuição	Log-Normal
Desvio padrão	1 dB
Desvanecimento por Multipercurso	
Distribuição	Ricean
Fator K	Predição (Morfologia)

A Tabela 3.4 mostra as configurações da CPE (equipamento que faz a interface do usuário com o serviço) que, neste caso, representa o rádio do terminal móvel (celular). Uma das características relevantes é a potência máxima de saída igual a 0.199 W.

Tabela 3.4: Configurações Gerais da CPE

Potência máxima de saída (Transm.)	0,199 W
Ganho relativo de transmissão	0 dB
Perdas relativas de transmissão	1 dB
Ganho relativo de recepção	0 dB
Perdas relativas de recepção	1 dB

Além das configurações da CPE, é necessário estabelecer as características gerais do terminal móvel que podem ser vistas na Tabela 3.5. Por exemplo, a altura média determinada para o celular foi de 1.5 m acima do solo.

O programa CelPlanner também permite configurar os aspectos relacionados ao rádio de cada serviço, Tabela 3.6. A largura de banda para o LTE é 10 MHz, tanto para o rádio da Estação Rádio

Tabela 3.5: Configurações Gerais do terminal

Altura	1,5 m
Ganho nominal	0 dBd
Fator de polarização cruzada	20 dB

Base quanto para o terminal CPE, bem como a modulação para o serviço LTE se mantém nos dois rádios. Já o serviço de TV Digital possui largura de banda de 5 MHz e outras possibilidades de modulação. Todos os serviços são no modo de duplexação por divisão na frequência (FDD) e a potência máxima varia com cada tipo de rádio.

Tabela 3.6: Configurações de Rádio

Tipo	BTS	CPE	TVD
Largura de Banda	10 MHz	10 MHz	5 MHz
Modulação	QPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 1/2
	QPSK 3/4	QPSK 3/4	QPSK 2/3
	16 QAM 2/3	16 QAM 2/3	QPSK 3/4
	16 QAM 3/4	16 QAM 3/4	16 QAM 3/4
	64 QAM 2/3	64 QAM 2/3	16 QAM 3/4
	64 QAM 3/4	64 QAM 3/4	16 QAM 3/4
	64 QAM 5/6	64 QAM 5/6	16 QAM 3/4
			16 QAM 3/4
			16 QAM 3/4
Modo	FDD	FDD	FDD
Potência mínima	0,001 W	0,001 W	0,001 W
Potência Máxima	40 W	1 W	10 kW

Por fim, para configurar a técnica MIMO foram utilizadas duas antenas na transmissão e duas na recepção, desprezando a correlação. Como pode ser visto na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Parâmetros MIMO

	Transmissor	Receptor
Nº de antenas	2	2
Correlação	Desprezível	Desprezível

Além do ajuste dos parâmetros, é preciso escolher as antenas de transmissão para o LTE, para a TV Digital e para a recepção do assinante. As antenas e seus respectivos diagramas de radiação (apresentados pelo próprio *software*) estão representados nas Figuras 3.1 a 3.3.

A antena utilizada para o LTE representada na Figura 3.1 não está presente no banco de dados do CelPlanner, portanto é escolhido um outro modelo disponível em sites de fabricantes em arquivos próprios para o CelPlanner. Dessa forma o modelo escolhido é o mesmo utilizado nos testes de campo da ANATEL em Pirenópolis, encontra-se seu arquivo para CelPlanner na página virtual do fabricante CommScope [17].

A frequência de operação prática desta antena é de 700 MHz a 810 MHz, com ganho nominal de 14.4 dBd e dimensão de 2.45 m. Apesar da faixa de frequência não abranger, na prática, a frequência de 2500 MHz, este modelo foi utilizado também para simular a cobertura nessa frequência de 2500 MHz. A utilização da antena escolhida para o LTE na frequência de 2500 MHz não prejudica os resultados, já que no âmbito de simulação a frequência de operação pode ser escolhida de forma manual.

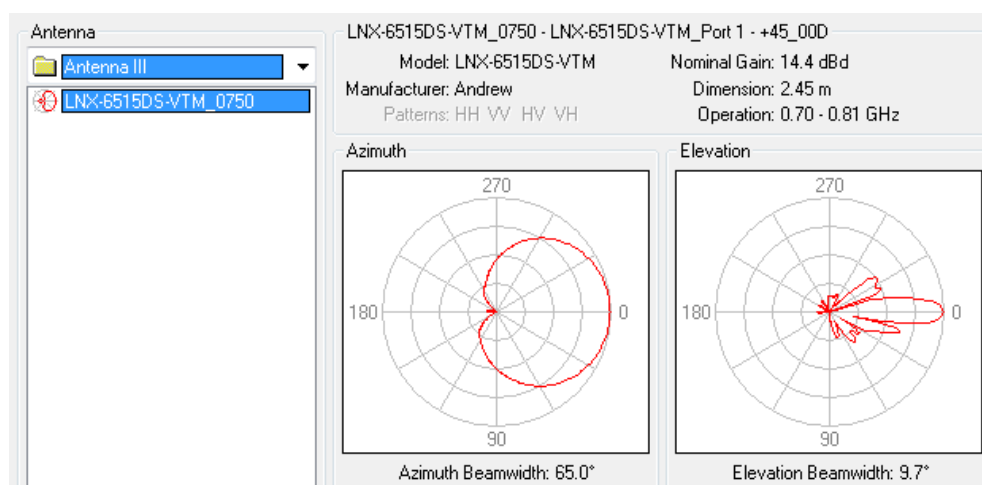


Figura 3.1: Antena para transmissão LTE

Para a transmissão de TV Digital foi utilizada uma antena omnidirecional padrão do CelPlanner com ganho nominal de 9.2 dBd, frequência de operação entre 0 e 1 GHz e dimensão de 1.5 m. Tais aspectos podem ser verificados na Figura 3.2.

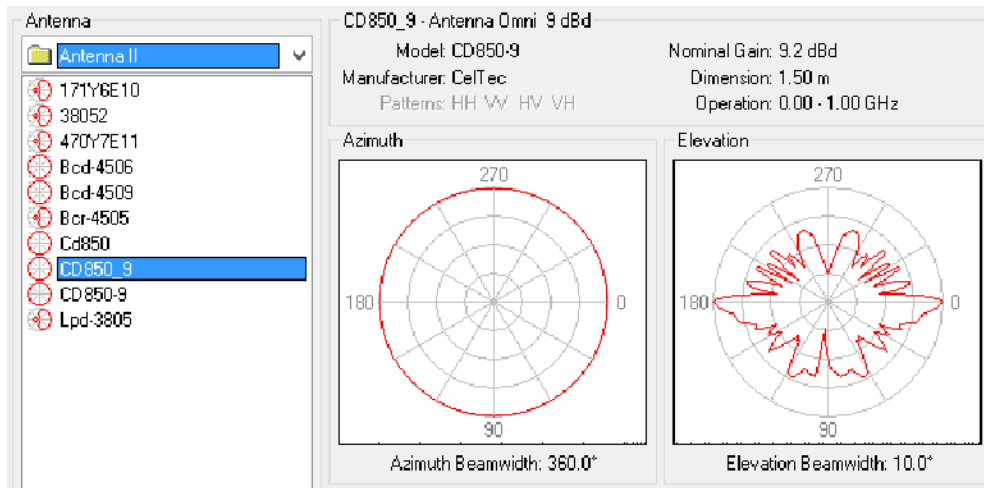


Figura 3.2: Antena para transmissão TVD

Para a recepção do sinal de TVD por parte do assinante, foi utilizado um modelo de antena Yagi de ganho nominal igual a 15 dBd e dimensão de 0.91 m. Apesar da faixa de frequência nominal ser de 410 a 430 MHz, com o ajuste manual da frequência tal modelo de adequou ao cenário simulado na frequência de 700 MHz.

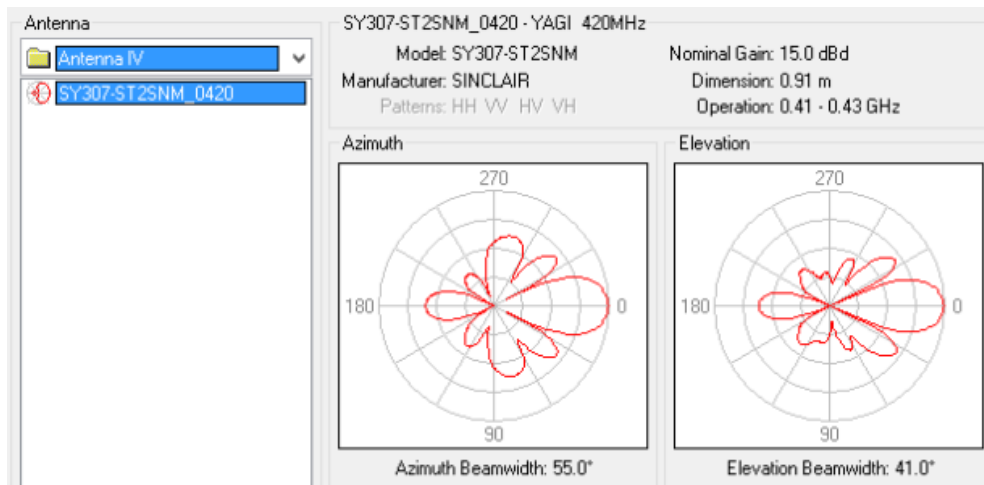


Figura 3.3: Antena para recepção do Assinante

3.2.1 Predição de Cobertura

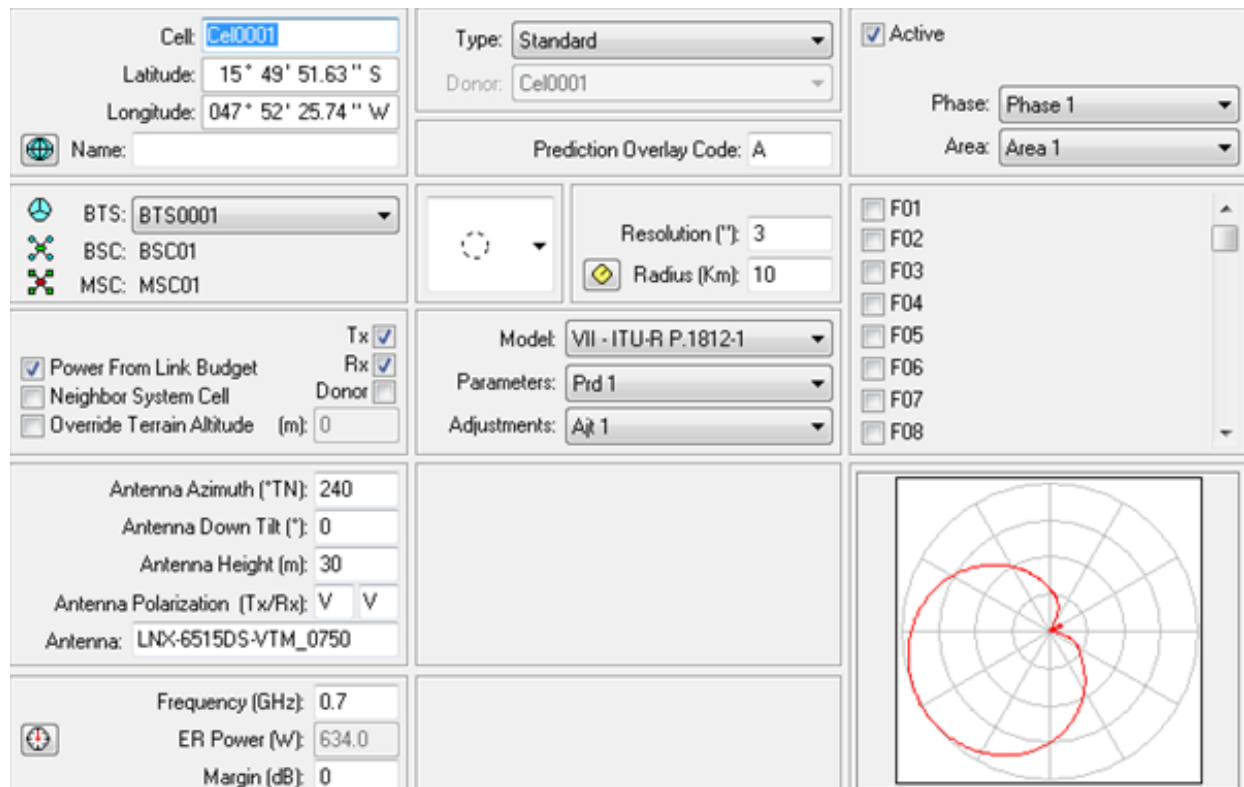
Para a predição de cobertura são feitas as configurações particulares para este estudo, apresentadas nas Figuras 3.4 a 3.7.

Dentro das configurações particulares está a configuração da célula, que se refere aos parâmetros de um dos três setores (antenas) de uma ERB. Tais setores são espaçados, preferencialmente, de 120 graus entre si.

Para a célula LTE em 700 MHz, representada na Figura 3.4, são determinadas as coordenadas

de localização da ERB de acordo com os dados cedidos pela operadora. Além disso configura-se o ângulo azimute da célula como 240 graus (posição na ERB em relação às outras células) e a altura da ERB em 30 m, a altura foi determinada de acordo com as estações da mesma operadora que cedeu as localizações das ERB's. Para cada célula é selecionado(a):

- O modelo de predição ITU-R P.1812-1;
- O modo de polarização Vertical para transmissão e recepção;
- A antena LNX-6515DS-VTM;
- O tilt igual a 0, ou seja, não há inclinação na antena;
- O raio de alcance máximo igual a 10 km;
- A frequência de 700 MHz.



The screenshot shows a software interface for configuring a 700 MHz cell. The interface is organized into several sections:

- Top Section:**
 - Cell:** Cel0001
 - Latitude:** 15° 49' 51.63" S
 - Longitude:** 047° 52' 25.74" W
 - Name:** (empty field)
 - Type:** Standard
 - Donor:** Cel0001
 - Prediction Overlay Code:** A
 - Active:** ☒
 - Phase:** Phase 1
 - Area:** Area 1
- Network Section:**
 - BTS:** BTS0001
 - BSC:** BSC01
 - MSC:** MSC01
- Model and Parameters Section:**
 - Model:** VII - ITU-R P.1812-1
 - Parameters:** Prd 1
 - Adjustments:** Adj 1
- Antenna Section:**
 - Antenna Azimuth (°TN):** 240
 - Antenna Down Tilt (°):** 0
 - Antenna Height (m):** 30
 - Antenna Polarization (Tx/Rx):** V V
 - Antenna:** LNX-6515DS-VTM_0750
- Frequency and Power Section:**
 - Frequency (GHz):** 0.7
 - ER Power (W):** 634.0
 - Margin (dB):** 0
- Additional Options:**
 - ☒ Power From Link Budget
 - ☐ Neighbor System Cell
 - ☐ Override Terrain Altitude (m): 0
 - ☒ Tx
 - ☒ Rx
 - ☐ Donor
- Resolution and Radius:**
 - Resolution (°):** 3
 - Radius (Km):** 10
- Frequency List:** A list of frequencies from F01 to F08, all of which are currently unchecked.
- Diagram:** A circular diagram showing the cell's coverage area. A red circle is drawn on the diagram, representing the 10 km radius. The diagram is overlaid on a grid.

Figura 3.4: Configuração da Célula de 700 MHz

Os demais dados referentes à célula LTE em 700 MHz são configurados no no balanceamento de enlace, demonstrado na Figura 3.5. Os parâmetros são:

- A potência de saída do amplificador do transmissor é igual a 40 W, pois o rádio comercial utiliza esse valor na prática;
- A potência do sinal de referência é calculada pelo modo automático do programa como sendo 18.24 dBm;
- Os ganhos de transmissão são iguais a 0 dB;
- As perdas na transmissão são iguais a 0 dB, pois já serão consideradas em cabos e conectores;
- A perda em cabo (transmissão e recepção) é igual a 4 dB a cada 10 m, como a maioria dos cabos comerciais;
- O comprimento do cabo é de 10 m (transmissão e recepção), considerando que o rádio esteja próximo à antena junto à torre de sustentação;
- A perda em conectores é igual a 0.5 dB e o número de conectores é igual a 4, dois conectando o rádio ao cabo e dois conectando o cabo à antena, tanto na transmissão quanto na recepção;
- O ganho da antena (transmissão e recepção) já foi especificado anteriormente como 14.4 dBd;
- A potência de saída do assinante, também determinada anteriormente, é 0.199 W;
- Os ganhos na recepção são de 3 dB, ganhos utilizados na recepção que recebe um nível de sinal baixo do celular;
- Não há perdas na recepção;
- Como determinado anteriormente, faz-se o uso de MIMO 2x2 desprezando a correlação;
- A potência efetivamente radiada é calculada pelo *software* como 58 dBm.

Tx Parameters		Rx Parameters	
Amplifier Output Power (W):	40.00	Subscriber Output Power (W):	0.199
☒ Reference Signal Power (dBm):	18.24	Base Antenna Rx Gain (dBd):	14.4
Transmission Gains (dB):	0	Reception Gains (dB):	3
Transmission Losses (dB):	0	Reception Losses (dB):	0
Cable Loss (dB/100 m):	4	Connection Loss (dB):	0.5
Cable Length (m):	10	Number of Connections:	4
Connection Loss (dB):	0.5	Cable Loss (dB/100 m):	4
Number of Connections:	4	Cable Length (m):	10
Base Antenna Tx Gain (dBd):	14.4	📶	

MIMO Parameters	
Number of Tx Antennas:	2
Correlation:	Negligible ▼
Number of Rx Antennas:	2
Correlation:	Negligible ▼

Beamforming	
Number of Tx Antenna Elements:	1
Number of Rx Antenna Elements:	1

Effective Radiated Power:	634.0 W (58.0 dBm)	dBm
---------------------------	--------------------	------------------------------------

Service Class:	Power Balance
☒ Class 1 ▼	Power Balance Factor (dB): 20.0
	Suggested Sector Output Power (W): 0.397
	Suggested Subscriber Output Power (W): 0.199

Figura 3.5: Balanceamento de enlace para 700 MHz

Para a célula LTE em 2500 MHz, representada na Figura 3.6, são determinadas as coordenadas de localização da ERB de acordo com os dados cedidos pela operadora. Além disso configura-se o ângulo azimute da célula como 240 graus (posição na ERB em relação às outras células) e a altura da ERB em 30 m, a altura foi determinada de acordo com as estações da mesma operadora que cedeu as localizações das ERB's. Para cada célula é selecionado(a):

- O modelo de predição ITU-R P.1812-1;
- O modo de polarização Vertical para transmissão e recepção;
- A antena LNX-6515DS-VTM;
- O tilt igual a 0, ou seja, não há inclinação na antena;
- O raio de alcance máximo igual a 10 km;

- A frequência de 2500 MHz.

Cell: Cel0001 Latitude: <input s"="" type="text" value="15° 49' 51.63"/> Longitude: <input type="text" value="047° 52' 25.74" w"=""/> Name:	Type: Standard Donor: Cel0001 Prediction Overlay Code: A	☒ Active Phase: Phase 1 Area: Area 1
BTS: BTS0001 BSC: BSC01 MSC: MSC01	<input):="" 3"="" type="text" value="Resolution ("/> ☒ Radius (Km): 10	☐ F01 ☐ F02 ☐ F03 ☐ F04 ☐ F05 ☐ F06 ☐ F07 ☐ F08
☒ Power From Link Budget ☐ Neighbor System Cell ☐ Override Terrain Altitude (m): 0	Tx ☒ Rx ☒ Donor ☐ Model: VII - ITU-R P.1812-1 Parameters: Prd 1 Adjustments: Adj 1	
Antenna Azimuth (*TN): 240 Antenna Down Tilt (*): 0 Antenna Height (m): 30 Antenna Polarization (Tx/Rx): V V Antenna: LNX-6515DS-VTM_0750		
Frequency (GHz): 2.5 ER Power (W): 875.1 Margin (dB): 0		

Figura 3.6: Configuração da Célula de 2500 MHz

Os demais dados referentes à célula LTE em 2500 MHz são configurados no no balanceamento de enlace, demonstrado na Figura 3.7. Os parâmetros são:

- A potência de saída do amplificador do transmissor é igual a 40 W, pois o rádio comercial utiliza esse valor na prática;
- A potência do sinal de referência é calculada pelo modo automático do programa como sendo 18.24 dBm;
- Os ganhos de transmissão são iguais a 0 dB;
- As perdas na transmissão são iguais a 0 dB, pois já serão consideradas em cabos e conectores;
- A perda em cabo (transmissão e recepção) é igual a 4 dB a cada 10 m, como a maioria dos cabos comerciais;
- O comprimento do cabo é de 10 m (transmissão e recepção), considerando que o rádio esteja próximo à antena junto à torre de sustentação;
- A perda em conectores é igual a 0.5 dB e o número de conectores é igual a 4, dois conectando o rádio ao cabo e dois conectando o cabo à antena, tanto na transmissão quanto na recepção;
- O ganho da antena (transmissão e recepção) como 15.8 dBd;
- A potência de saída do assinante, também determinada anteriormente, é 0.199 W;
- Os ganhos na recepção são de 3 dB, ganhos utilizados na recepção que recebe um nível de sinal baixo do celular;
- Não há perdas na recepção;
- Como determinado anteriormente, faz-se o uso de MIMO 2x2 desprezando a correlação;
- A potência efetivamente radiada é calculada pelo *software* como 59.4 dBm.

Tx Parameters Amplifier Output Power (W): 40.00 ☒ Reference Signal Power (dBm): 18.24 Transmission Gains (dB): 0 Transmission Losses (dB): 0 Cable Loss (dB/100 m): 4 Cable Length (m): 10 Connection Loss (dB): 0.5 Number of Connections: 4 Base Antenna Tx Gain (dBd): 15.8		Rx Parameters Subscriber Output Power (W): 0.199 Base Antenna Rx Gain (dBd): 15.8 Reception Gains (dB): 3 Reception Losses (dB): 0 Connection Loss (dB): 0.5 Number of Connections: 4 Cable Loss (dB/100 m): 4 Cable Length (m): 10	
			
MIMO Parameters Number of Tx Antennas: 2 Correlation: Negligible			
Number of Rx Antennas: 2 Correlation: Negligible			
Beamforming Number of Tx Antenna Elements: 1 Number of Rx Antenna Elements: 1			
Effective Radiated Power: 875.1 W (59.4 dBm) dBm			
Service Class: ☒ Class 1		Power Balance Power Balance Factor (dB): 20.0 Suggested Sector Output Power (W): 0.397 Suggested Subscriber Output Power (W): 0.199	

Figura 3.7: Balanceamento de enlace para 2500 MHz

O local de estudo foi a cidade de Brasília, na região do Plano Piloto, apresentada na Figura 3.8. Para realizar a predição de cobertura foram plotadas todas as ERB's de tecnologia LTE em 2500 MHz de uma operadora do Distrito Federal, as localizações bem como as especificações das estações foram cedidas pela própria empresa para fins educacionais.



Figura 3.8: Região de Brasília para Predição de Cobertura

3.2.2 Teste de Interferência

Este estudo consiste em verificar a interferência do sinal de enlace direto do LTE na recepção do sinal de TV Digital por um assinante em ambiente externo, para o ambiente interno foi aplicado um valor de atenuação especificado no capítulo 5.

A fim de verificar a interferência, foram utilizadas as frequências de 700, 705 e 710 MHz para distribuir entre os setores das estações LTE, para que não haja interferência no mesmo canal entre os próprios sinais LTE. O sinal de TV foi transmitido na frequência de 695 MHz.

Para o estudo de interferência foram realizadas simulações em dois cenários, um cenário geral de todo o Plano Piloto e regiões próximas e outro cenário na borda da transmissão de TV. Os cenários estão representados nas Figuras 3.9 e 3.10.

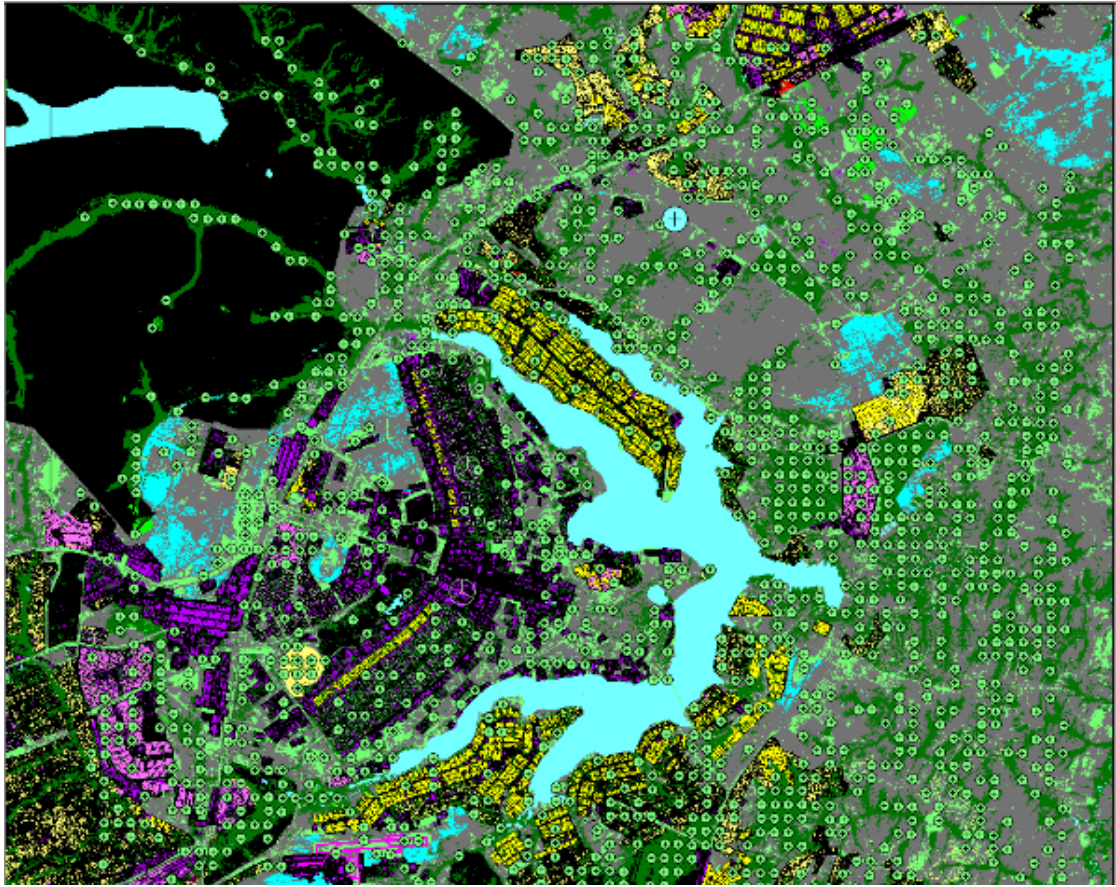


Figura 3.9: Cenário Geral de Interferência

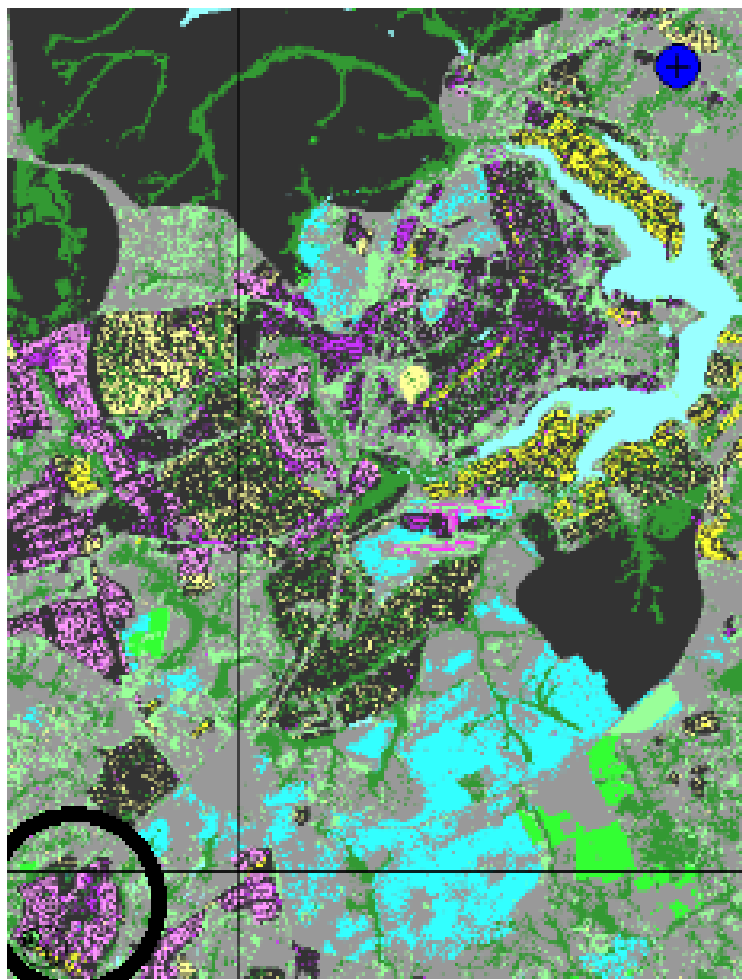


Figura 3.10: Cenário de Borda de Interferência

Para o cenário geral é feita uma distribuição de assinantes, função disponível no próprio *software*. Os assinantes utilizados recebem as configurações representadas na Figura 3.11.

Além da configuração dos assinantes, são configuradas três ERB's com as características do sistema LTE em 700 MHz do estudo anterior, e a ERB para transmissão de TV Digital com os parâmetros representados nas Figuras 3.12 e 3.13. Vale ressaltar que a localização da estação de TV é a localização da nova torre de TV Digital do Distrito Federal.

Por fim observa-se que, para definir o cenário de borda, simula-se a predição de cobertura do sinal de TV (Figura 3.14) e próximo à borda desse sinal são posicionados uma ERB e um assinante.

Os parâmetros referentes aos assinantes (em todos os cenários) estão representados na Figura 3.11 possuem as seguintes configurações:

- Sua identificação, no caso da distribuição;
- Tipo de rádio CPE do tipo receptor somente, já que simula uma antena externa de TV Digital;
- A célula que o serve é a célula de TVD;
- A altura da antena é de 2 m, representando a recepção externa em uma casa;
- O modelo de antena Yagi definido anteriormente;
- Sem a presença de MIMO.

The screenshot shows a software interface for configuring a subscriber. The main window is titled "Subscriber CelPlan". It contains several sections:

- Description:** A text field containing "Subscriber CelPlan" and a "Selected" button.
- Subscriber Information:**
 - Identification: SbCr0000445
 - Latitude: 15° 44' 34.61" S
 - Longitude: 047° 55' 53.50" W
- Server Information:**
 - Cell: Cel0007 (with a green status indicator)
- Service and Radio Settings:**
 - Service: Service 1 (dropdown)
 - Radio Type: CPE (dropdown)
 - Environment: Static (dropdown)
- Antenna and Type Settings:**
 - Type (Tx/Rx): R
 - Antenna Height (m): 2
 - Maximum Power (W): 1.000
 - Transmission Losses (dB): 1
 - Reception Losses (dB): 1
 - Assignment Probability (%): 100
 - Antenna: SY307-ST2SNM_0420 (dropdown)
 - Antenna Cross Polarization (dB): 20
- Active Status and Color:**
 - Active: ☒ (Color: Red)
 - Phase: Phase 1 (dropdown)
 - Area: Area 1 (dropdown)
- Frequencies:** A list of checkboxes for F01 through F08, all of which are unchecked.
- MIMO Settings:**
 - Tx: 1 Antenna
 - Rx: 1 Antenna
 - Correlation: Negligible (dropdown)
- Distance and Azimuth:**
 - Dst: 5.430 Km
 - AzT: 102.5°
 - AzM: 123.8°
 - Inc: 0.2°
- Navigation and Status:**
 - Navigation buttons: Play, Stop, Previous, Next, First, Last.
 - Status: Subscriber 446 / 1286

Figura 3.11: Configuração dos Assinantes

Para a célula da TV Digital, representada na Figura 3.12, são determinadas as coordenadas de localização da estação no mesmo do local da Torre de TV Digital de Brasília. Além disso configura-se o ângulo azimuth da célula como 0 graus (uma única célula omnidirecional) e a altura da estação em 182 m, a altura foi determinada de acordo com a altura da estação na Torre de TV Digital. Para cada célula é selecionado(a):

- O modelo de predição ITU-R P.1546-4;
- O modo de polarização Horizontal para transmissão e Vertical para recepção;
- A antena Omnidirecional descrita anteriormente;
- O tilt igual a 0, ou seja, não há inclinação na antena;
- O raio de alcance máximo igual a 50 km;
- A frequência de 695 MHz.

Cell: Cel0011 Latitude: 15° 41' 57.95" S Longitude: 047° 49' 47.07" W Name:	Type: Standard Donor: Cell0001	☒ Active Phase: Phase 1 Area: Area 1
BTS: BTS0002 BSC: BSC02 MSC: MSC02	Prediction Overlay Code: M Resolution ("): 10 ☒ Radius (Km): 50	☐ F01 ☐ F02 ☐ F03 ☐ F04 ☐ F05 ☐ F06 ☐ F07 ☐ F08
☒ Power From Link Budget ☐ Neighbor System Cell ☐ Override Terrain Altitude (m): 0	Tx ☒ Rx ☐ Donor ☐ Model: VIII - ITU-R P.1546-4 Parameters: Prd 1 Adjustments: Ajt 1	
Antenna Azimuth (°TN): 0 Antenna Down Tilt (°): 0 Antenna Height (m): 182 Antenna Polarization (Tx/Rx): H V Antenna: CD850_9		
Frequency (GHz): 0.695 ER Power (W): 3244 Margin (dB): 0		

Figura 3.12: Configuração da Célula de TVD

Os demais dados referentes à célula de TV Digital são configurados no no balanceamento de enlace, demonstrado na Figura 3.13. Os parâmetros são:

- A potência de saída do amplificador do transmissor é igual a 800 W, pois esse é o menor valor utilizado na prática;
- A potência do sinal de referência é calculada pelo modo automático do programa como sendo 18.24 dBm;
- Os ganhos de transmissão são iguais a 0 dB;
- As perdas na transmissão são iguais a 0 dB, pois já serão consideradas em cabos e conectores;
- A perda em cabo é igual a 4 dB a cada 10 m, como a maioria dos cabos comerciais;
- O comprimento do cabo é de 28 m, considerando que o rádio esteja próximo à antena junto à torre de sustentação;
- A perda em conectores é igual a 0.5 dB e o número de conectores é igual a 4, dois conectando o rádio ao cabo e dois conectando o cabo à antena;
- O ganho da antena como 9.2 dBd;
- Como determinado anteriormente, não faz-se o uso de MIMO;
- A potência efetivamente radiada é calculada pelo *software* como 65.1 dBm.

Tx Parameters		Rx Parameters	
Amplifier Output Power (W):	800.0	Subscriber Output Power (W):	0.600
☒ Reference Signal Power (dBm):	18.24	Base Antenna Rx Gain (dBd):	14
Transmission Gains (dB):	0	Reception Gains (dB):	3
Transmission Losses (dB):	0	Reception Losses (dB):	0
Cable Loss (dB/100 m):	4	Connection Loss (dB):	0.5
Cable Length (m):	28	Number of Connections:	4
Connection Loss (dB):	0.5	Cable Loss (dB/100 m):	4
Number of Connections:	4	Cable Length (m):	28
Base Antenna Tx Gain (dBd):	9.2		
MIMO Parameters			
Number of Tx Antennas:	1	Number of Rx Antennas:	1
Correlation:	Negligible	Correlation:	Negligible
Beamforming			
Number of Tx Antenna Elements:	1	Number of Rx Antenna Elements:	1
Effective Radiated Power: 3244 W (65.1 dBm)		dBm	
Service Class:	Power Balance		
☒ Class 1	Power Balance Factor (dB):	28.2	
	Suggested Sector Output Power (W):	1.199	
	Suggested Subscriber Output Power (W):	0.199	

Figura 3.13: Balanceamento de enlace para a TVD

3.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados alguns aspectos e características necessárias para o Planejamento de Redes Sem Fio. Além disso, as configurações e cenários do CelPlanner foram definidos. No próximo capítulo serão estudadas as predições de cobertura das Estações Rádio Base nas frequências de 700 e 2500 MHz para a região do Plano Piloto.

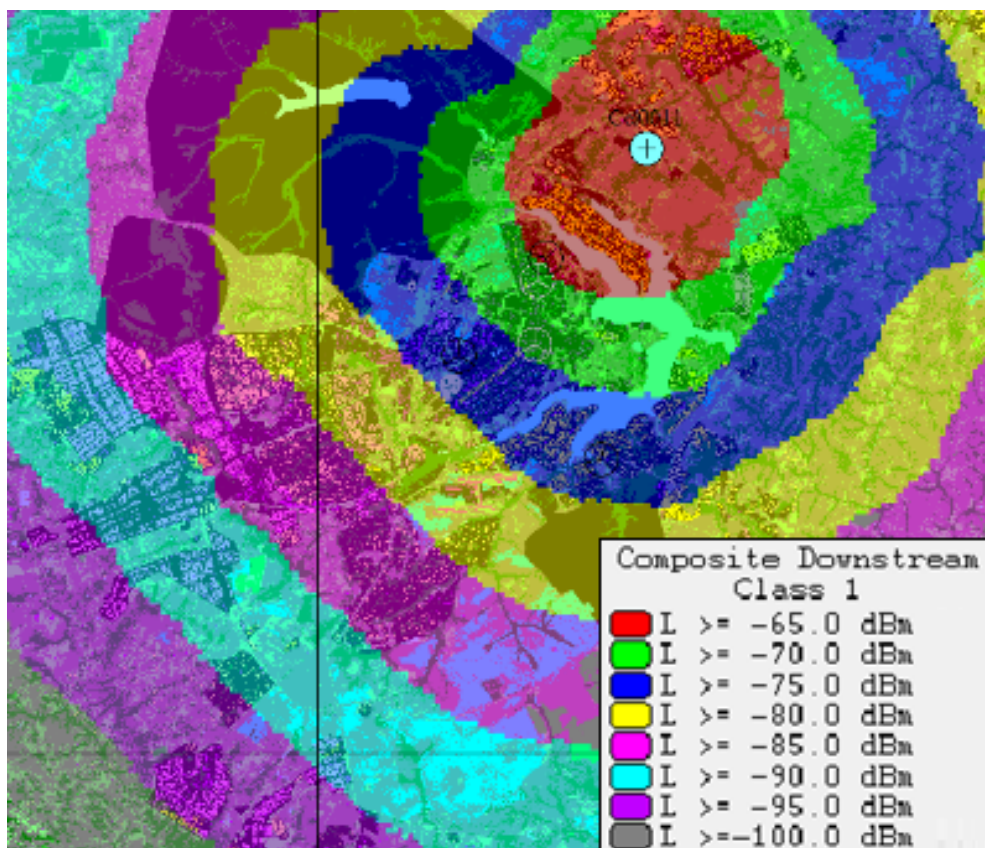


Figura 3.14: Predição de cobertura da TVD

Capítulo 4

Análises e Resultados: Predição de Cobertura

Ao realizar todas as configurações, a predição de cobertura é realizada e salva em formato KML para aberta no programa *Google Earth*. A seguir podem ser vistas as predições para as duas frequências estudadas (700 MHz e 2500 MHz). A figura da predição já possui a legenda das cores que representam os diferentes níveis de sinal. Há, também, a porcentagem que cada nível de sinal representa na cobertura total, o que possibilita uma melhor comparação entre faixas de frequência diferentes.

4.1 Cobertura para LTE 700 MHz e 2500 MHz

A predição de cobertura para o sinal LTE em 700 MHz pode ser observada na Figura 4.1. A predição de cobertura para o sinal LTE em 2500 MHz pode ser observada na Figura 4.2.

Com estas imagens das predições de cobertura fica evidente a vantagem de se implementar o sistema LTE em 700 MHz: nesta frequência mais de 70% do sinal tem sua intensidade acima de -65 dBm enquanto que em 2500 MHz somente 48% do sinal tem intensidade acima deste valor.

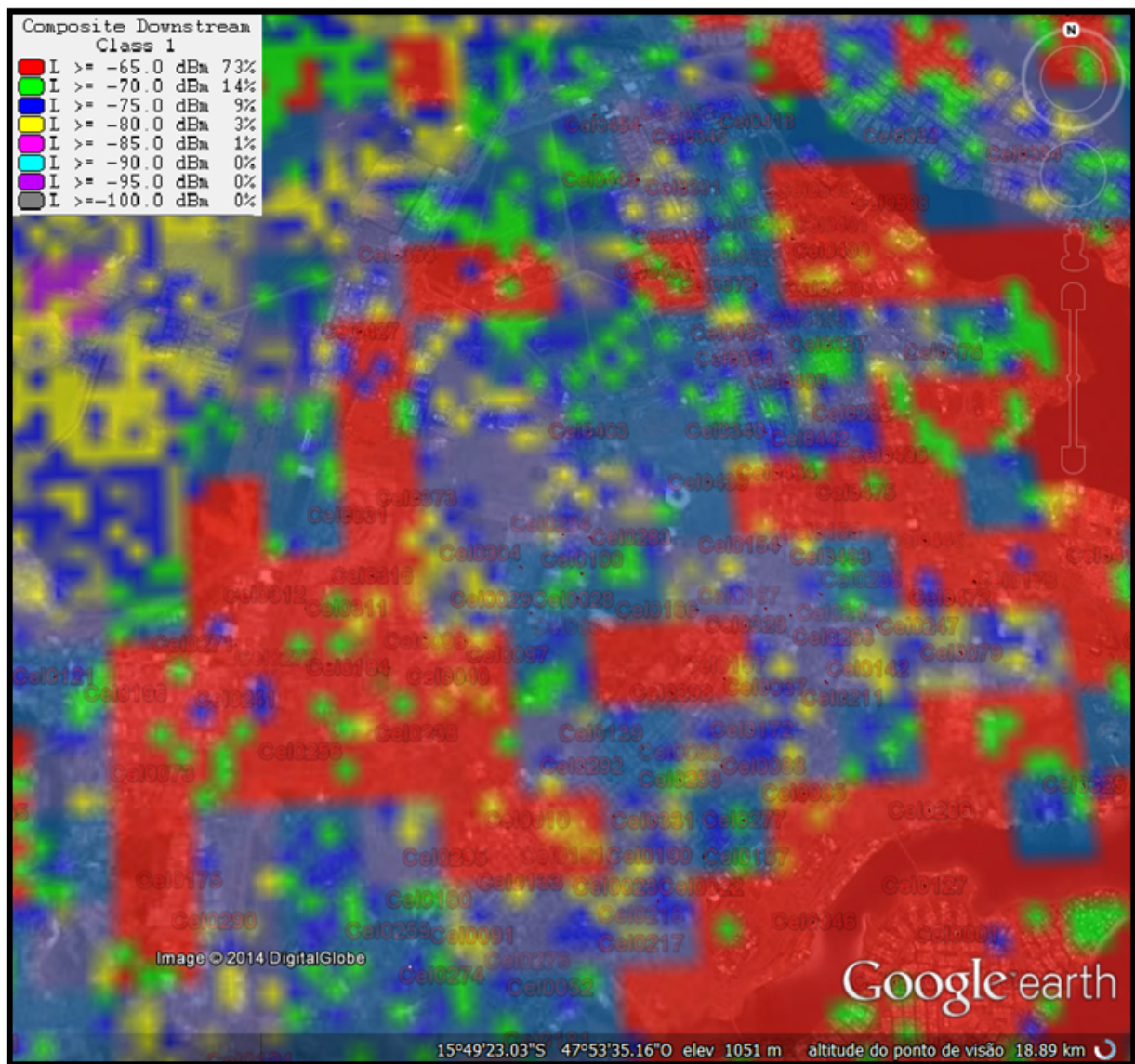


Figura 4.1: Predição de cobertura do LTE em 700 MHz

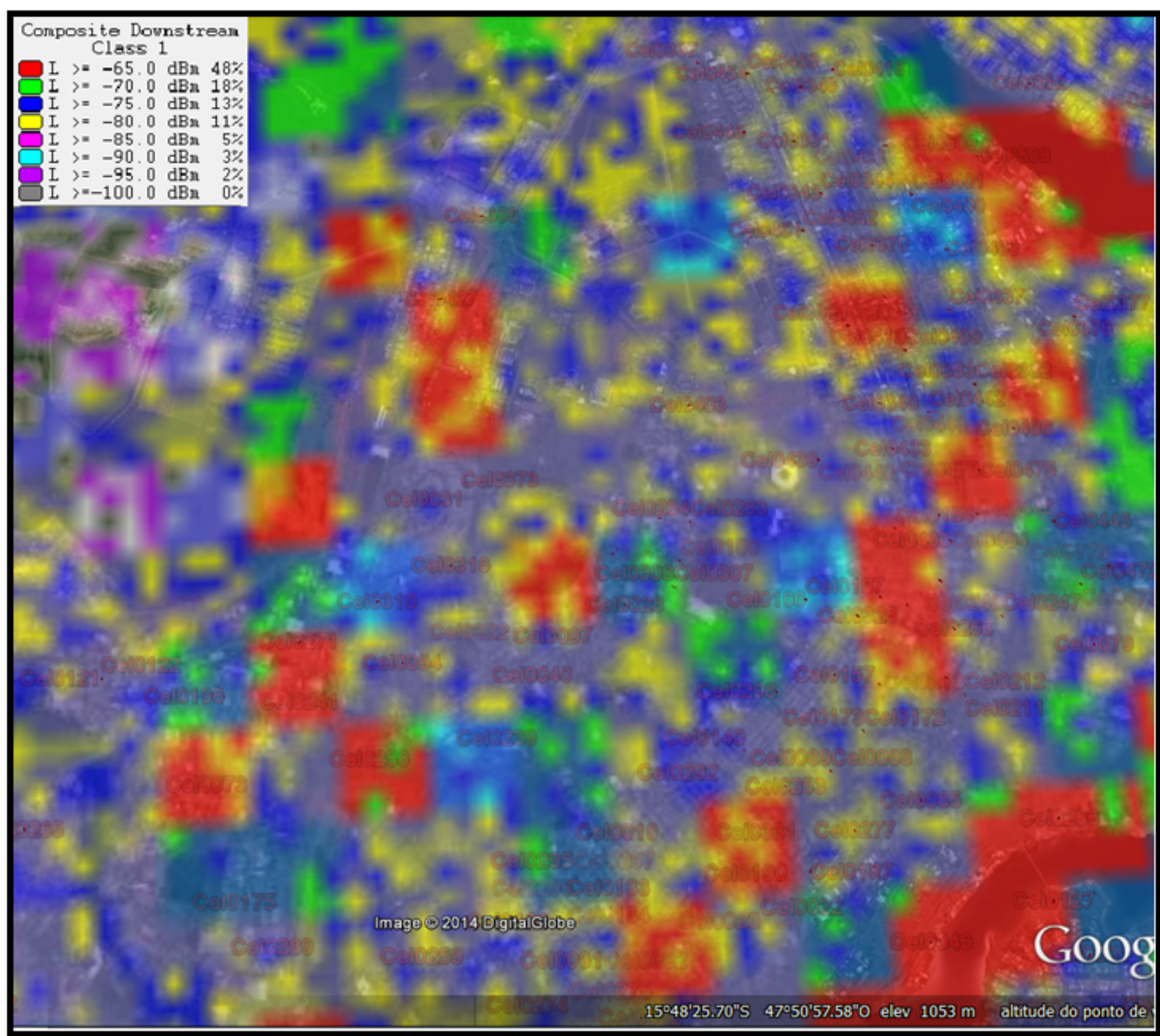


Figura 4.2: Predição de cobertura do LTE em 2500 MHz

4.2 Análise comparativa

Após obtidos os resultados das simulações, foi possível perceber como seria a cobertura do enlace de descida da rede LTE em Brasília e, também, a diferença de predição entre as duas faixas de frequência (700 e 2500 MHz). O parâmetro utilizado para a comparação é o nível de sinal (representado na legenda de cores das Figuras 4.1 e 4.2), como pode ser visto na Tabela 4.1.

Nível de Sinal	% em 700MHz	% em 2500 MHz
≥ -65 dBm	73%	48%
≥ -70 dBm	14%	18%
≥ -75 dBm	9%	13%
≥ -80 dBm	3%	11%
≥ -85 dBm	0%	5%
≥ -90 dBm	0%	3%
≥ -95 dBm	0%	2%

Tabela 4.1: Comparação entre o nível de sinal em 700 MHz e 2500 MHz

Nos resultados das predições de cobertura para o enlace de descida, observa-se que o nível de sinal é maior na frequência de 700 MHz comparado à frequência de 2500 MHz. O maior alcance de 700 MHz observado já era esperado, já que o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência e quanto maior o comprimento de onda maior o alcance. Também, para pequenos comprimentos de onda, os pequenos obstáculos já exercem influência na atenuação do sinal.

Vale ressaltar que a predição foi feita utilizando as Estações Rádio Base necessárias para a cobertura do LTE na faixa de 2500 MHz, ou seja, para a faixa de 700 MHz a quantidade de ERB's seria menor. Isso seria possível porque, quando um sinal tem maior alcance e maior intensidade, menos ERB's são necessárias para cobrir determinada região.

Com isso pode ser realizada uma comparação econômica na análise dessas duas faixas de frequência. Por exemplo, o sistema de 700 MHz exige menos estações do que o sistema de 2500 MHz o que significa um menor custo de implementação do sistema de comunicação de 700 MHz, isto pode ser visto na Figura 4.3.

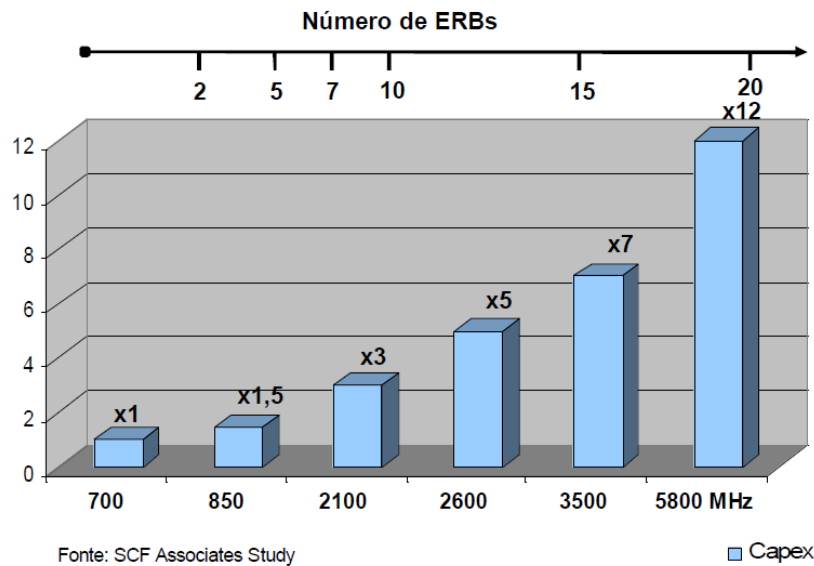


Figura 4.3: Valores de Capex para implantação de infraestrutura de redes de comunicação sem fio para diferentes faixas de frequências [1]

Por fim, a diferença entre as duas faixas de frequência foi nítida, o que resulta em uma possibilidade de crescimento nas redes celulares com o uso da faixa de 700 MHz para o LTE.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as predições de cobertura das Estações Rádio Base nas frequências de 700 e 2500 MHz para a região do Plano Piloto, bem como foi feita uma análise comparativa entre as duas frequências. O potencial da rede LTE para a frequência de 700 MHz demanda o estudo dos efeitos de sua implementação no Brasil, dessa forma o próximo capítulo apresenta o estudo de interferência entre os sinais de TVD e os sinais de LTE.

Capítulo 5

Análises e Resultados: Interferência entre LTE e TVD

Para realizar o estudo de interferência, foi realizada uma simulação para predição de interferência no *software* CelPlanner em conjunto com testes práticos de interferência. As análises deste estudo são baseadas e comparadas aos resultados dos testes de campo realizados pela ANATEL em Pirenópolis-GO.

5.1 Testes no CelPlanner

A simulação de interferência do CelPlanner dá como resultado um arquivo de texto com os níveis de sinal de cada ERB no assinante, inclusive o nível de sinal da TVD. Assim foi possível calcular a relação de proteção (PR) de acordo com a Equação 5.1, sendo o LTE o sinal interferente e o sinal de TVD o interferido.

$$PR(dB) = Pot_{SinalInterferido}(dBm) - Pot_{SinalInterferente}(dBm) \quad (5.1)$$

Como resultado, apresenta-se uma tabela que mostra os melhores e piores casos de relação de proteção em cada cenário. Para complementar a tabela foi calculada a distância entre o assinante e a estação LTE e a estação de TVD. Tal distância foi calculada utilizando as coordenadas do assinante que contém no arquivo e as coordenadas da respectivas ERB's.

Como a predição foi feita para um assinante externo devido a limitações do programa, para estimar os valores em ambiente interno foi utilizado um fator que diminui a PR em 10 dB.

5.1.1 Cenário Geral

No cenário geral foram distribuídos ao todo 1286 assinantes, três estações LTE com três setores cada e a estação de TVD. Após a realização da predição, as relações de proteção foram calculadas para cada assinante e selecionadas os melhores e piores valores. A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para o cenário geral.

Tabela 5.1: Resultado da simulação de interferência no Cenário Geral

AMBIENTE EXTERNO						
	Setores 1,2,3		Setores 7,8,9		Setores 15,16,17	
	PR [dB]	Dist TVD [Km]	PR [dB]	Dist TVD [Km]	PR [dB]	Dist TVD [Km]
max	96,7	15,44	77	8,20	124,9	17,38
min	-10,1	15,44	-14	8,20	-28,3	17,38
AMBIENTE INTERNO						
	Setores 1,2,3		Setores 7,8,9		Setores 15,16,17	
	PR [dB]	Dist TVD [Km]	PR [dB]	Dist TVD [Km]	PR [dB]	Dist TVD [Km]
max	86,7	15,44	67	8,20	114,9	17,38
min	-20,1	15,44	-24	8,20	-38,3	17,38

5.1.2 Cenário de Borda

No cenário de borda a predição foi realizada apenas para um assinante, uma estação LTE com três setores e a estação de TV Digital. A Tabela 5.2 apresenta os resultados para o cenário de borda.

Tabela 5.2: Resultado da simulação de interferência no Cenário de Borda

Ambiente	Dist ERB [Km]	Dist TvD [Km]	Sinal de TV [dBm]	Setor 7		Setor 8		Setor 9	
				Sinal LTE	PR [dB]	Sinal LTE	PR [dB]	Sinal LTE	PR [dB]
EXTERNO	0,59	45,00	-69,8	-56,9	-12,9	-61,7	-8,1	-31	-38,8
INTERNO	0,59	45,00	----	----	-22,9	----	-18,1	----	-48,8

5.2 Testes práticos de interferência

5.2.1 Cenário de medição

Os testes consistem em observar o efeito de um sinal transmitido na faixa de 700 MHz na recepção do sinal de TVD recebido por um aparelho televisor. Para realizar os testes de campo foi montado um cenário com a recepção do sinal da TV Digital por um aparelho de televisão e com a transmissão de um sinal na frequência próxima a 700 MHz por um analisador de espectro portátil. Tal cenário pode ser observado nas Figuras 5.1 e 5.2.



Figura 5.1: Cenário dos testes práticos de interferência

Os testes foram realizados para a recepção de TV sem e com amplificador variável de 20dB, o amplificador está representado na Figura 5.3.



Figura 5.2: Recepção de TVD dos testes práticos de interferência



Figura 5.3: Amplificador variável de 20dB para Recepção de TVD

Os canais escolhidos para os testes foram os canais da TV Senado e da TV Justiça, já que estes são os mais próximos da frequência do Dividendo Digital. As características referentes a estes canais podem ser verificadas na Tabela 5.3.

O sinal que representa o LTE é gerado no analisador de espectro portátil, representado na Figura 5.4, e transmitido com sua antena direcionada para a antena que recebe o sinal de TV.

Para calcular a relação de proteção na recepção do sinal de TV, é necessário obter o valor do sinal LTE na recepção de TV. Para isso foi montado um sistema de recepção LTE próximo a TV para se obter o valor do sinal LTE com a ajudar do analisador de espectro de bancada, que está representado na Figura 5.5.

Dessa forma, para se obter o sinal LTE interferente, é utilizado o valor lido pelo analisador de espectro da recepção, acrescentando as perdas com cabos e conectores e retirando o ganho da antena de recepção do LTE. Tais valores serão apresentados mais a frente nos resultados. O ganho da antena utilizada pode ser visto na Tabela 5.4, bem como outras especificações.

Tabela 5.3: Características dos Canais de TV

TV Senado		TV Justiça	
Nível de Sinal SEM amplif. [dBm]	-74	Nível de Sinal SEM amplif. [dBm]	-75
Nível de Sinal COM amplif.[dBm]	-54	Nível de Sinal COM amplif.[dBm]	-55
Frequência Central [MHz]	689,143	Frequência Central [MHz]	701,143
Largura de Banda [MHz]	6	Largura de Banda [MHz]	6

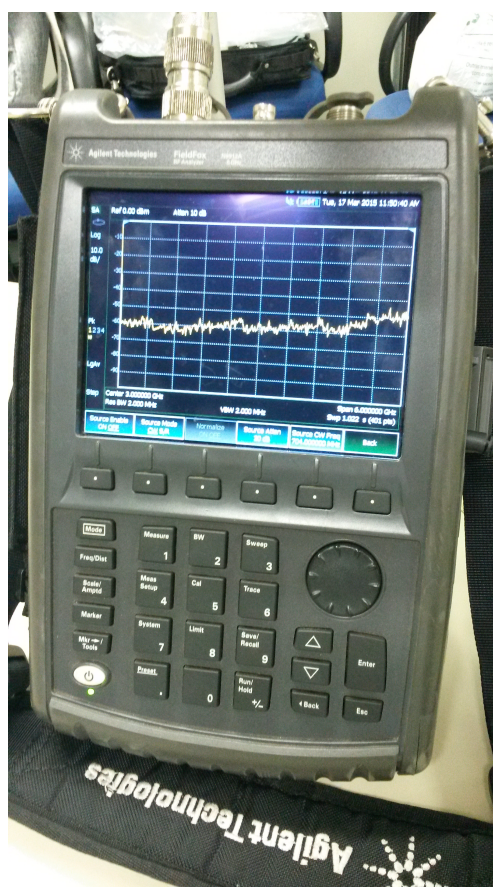


Figura 5.4: Analisador de espectro portátil

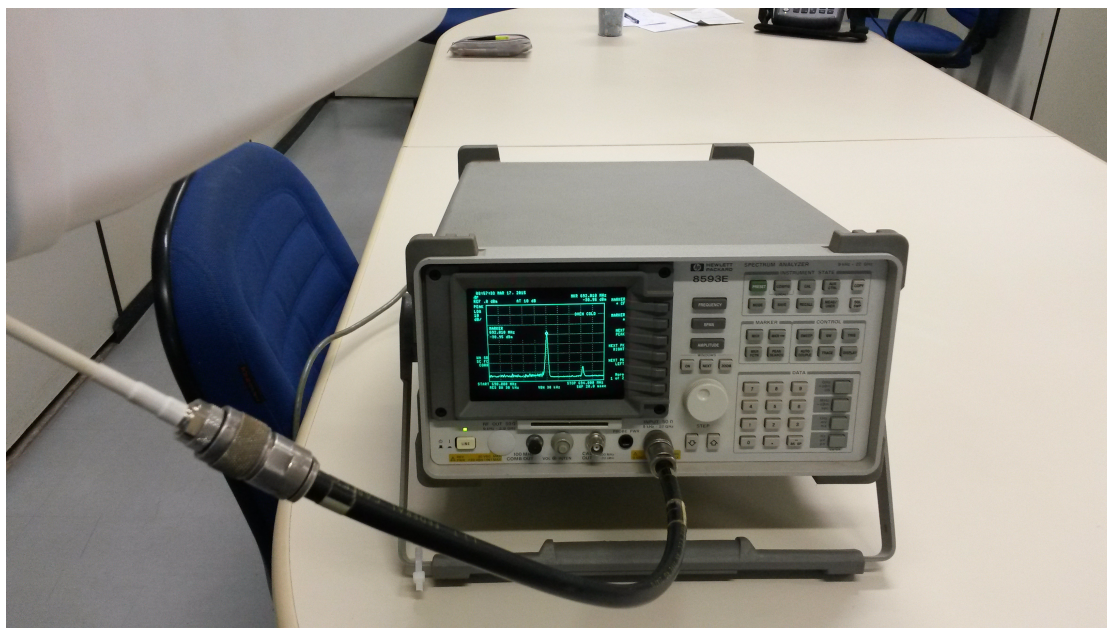


Figura 5.5: Analisador de espectro de bancada

Tabela 5.4: Especificações da antena LTE dos testes de interferência

Faixa de Frequência	700 - 800 MHz	800 - 915 MHz	915 - 1710 MHz	1710 - 1850 MHz	1850 - 1990 MHz	1990 - 2700 MHz
Ganho	8 dBi	8 dBi	7 dBi	9 dBi	10.5 dBi	10 dBi
Largura do feixe Horizontal	70° a 90°					
Largura do feixe Vertical	85° a 110°					
Razão F/B	≥ 20 dB					
Polarização	Vertical					
Máxima Potência	100 watts					

5.2.2 Resultados

Para verificar a interferência do sinal LTE na recepção de TV foi feita uma observação da imagem da TV; se esta imagem sofria interferência a ponto de ficar com falhas (blocos), a ponto de interromper o sinal mas este voltar e a ponto de interromper o sinal permanentemente (acabar com o sinal).

Primeiramente ajustava-se o analisador de espectro para sua atenuação máxima e selecionava-se uma frequência 5 MHz acima da frequência do respectivo canal de TV. Iniciava-se a transmissão e diminuía a atenuação até que alguma interferência fosse observada. Caso não houvesse interferência, a transmissão era interrompida, a atenuação era elevada ao seu máximo novamente, a frequência era diminuída em 1 MHz e o processo era retomado até que houvesse a interferência.

Portanto os parâmetros ajustados ou obtidos são considerados quando ocorre a observação de um dos efeitos de interferência na imagem da TV. Dessa forma os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: Resultado final dos testes práticos de interferência para a TV Senado

TV Senado sem AMP	Transmissão		Recepção			Sinal LTE interferente [dBm]	PR - Relação de Proteção [dB]
	Frequência [MHz]	Atenuação [dB]	Nível LTE [dBm]	Perdas [dB]	Ganho Ant. [dB]		
Blocar	692	12	-30,5	7	8	-31,5	-42,5
Interromper o Sinal	692	10	-28,7	7	8	-29,7	-44,3
Acabar com o Sinal	692	8	-26,6	7	8	-27,6	-46,4

TV Senado com AMP	Transmissão		Recepção			Sinal LTE interferente [dBm]	PR - Relação de Proteção [dB]
	Frequência [MHz]	Atenuação [dB]	Nível LTE [dBm]	Perdas [dB]	Ganho Ant. [dB]		
Blocar	692	6	-25	7	8	-26	-28
Interromper o Sinal	692	4	-23	7	8	-24	-30
Acabar com o Sinal	692	2	-21	7	8	-22	-32

Tabela 5.6: Resultado final dos testes práticos de interferência para a TV Justiça

TV Justiça com AMP	Transmissão		Recepção			Sinal LTE interferente [dBm]	PR - Relação de Proteção [dB]
	Frequência [MHz]	Atenuação [dB]	Nível LTE [dBm]	Perdas [dB]	Ganho Ant. [dB]		
Blocar	703,5	12	-31	7	8	-32	-23
Interromper o Sinal	703,5	10	-28,8	7	8	-29,8	-25,2
Acabar com o Sinal	703,5	8	-27,4	7	8	-28,4	-26,6

Sendo os parâmetros de recepção referentes aos ajustes do transmissor, e a relação de proteção obtida por meio do valor do sinal de TV menos o valor do sinal de LTE interferente. Vale ressaltar que só houve o sinal consistente da TV Justiça, para a realização dos testes, com o uso de amplificador.

5.3 Análise dos Resultados

Após a obtenção dos resultados é possível observar que alguns valores de relação de proteção obtidos no CelPlanner coincidem com os valores obtidos nos testes práticos. Tais valores também foram comparados com os valores dos testes da ANATEL e foi observada uma semelhança.

Os testes da ANATEL avaliaram outros tipos de interferência além da interferência do sinal LTE do enlace direto sobre a recepção da TV Digital [18]. Portanto, para este estudo comparativo, somente serão utilizados os resultados da ANATEL para antena interna com amplificação. Os resultados da ANATEL estão representados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados obtidos no teste de *downlink*, com antenas internas, com TVD operando no canal 51 e LTE com 100% de tráfego de dados. [18]

Antena	Receptor	Tx TV [W]	Tx LTE [W]	Aten. Rx [dB]	Rx TV [dBm]	Rx LTE [dBm]	Rx TV - Rx LTE [dB]
Interna Passiva	Rx 1	---	40	---	-74	---	Não Observado
	Rx 2	---	40	---	-74	---	Não Observado
	Rx 3	---	40	---	-74	---	Não Observado
Interna Amplificada	Rx 1	2,5	2,5	10,0	-74,0	-34,5	-39,5
		4,0	10,0	0,0	-62,5	-20,3	-42,2
		79,4	12,6	0,0	-50,0	-17,5	-32,5
	Rx 2	7,9	12,6	13,0	-73,7	-30,8	-42,9
		4,0	10,0	0,0	-62,5	-20,3	-42,2
		79,4	12,6	0,0	-50,0	-17,5	-32,5
	Rx 3	2,5	2,5	10,0	-74,0	-34,5	-39,5
		4,0	10,0	0,0	-62,5	-20,3	-42,2
		79,4	12,6	0,0	-50,0	-17,5	-32,5

Dessa forma é possível identificar a semelhança entre os valores de relação de proteção dos testes práticos da ANATEL com os obtidos neste estudo, atingindo os resultados esperados. Além disso, semelhante ao teste da ANATEL, é possível determinar uma forma de mitigar a interferência.

5.4 Proposta para mitigar a interferência

O espaço no espectro destinado pela ANATEL para o serviço móvel em 700 MHz corresponde à faixa de frequência entre 698 MHz a 806 MHz [13]. Para mitigar a interferência, pode ser utilizado um filtro na entrada do aparelho de TV de forma que somente o sinal de TV seja recebido.

O objetivo do filtro é permitir que apenas o sinal de TV Digital seja percebido no receptor de TV. Dessa forma nos casos em que ocorrer a interferência será necessário utilizar o filtro, o que pode aumentar o custo de implantação da TV Digital nesses casos. O estudo econômico da implementação dos filtros não é escopo deste trabalho.

Para definir a máscara do filtro, é preciso determinar qual a sua largura de banda, ou seja, até que valor de frequência este filtro permitirá que seja recebido pelo aparelho de TV. A fim de se obter esse valor de frequência são levados em conta dois pontos:

- A proximidade do canal 51 (692 MHz a 698 MHz) dos canais de TV e dos canais da subfaixa destinada para o serviço móvel em 700 MHz, que se inicia em logo em 698 MHz como pode ser visto na Figura 5.6;
- A interferência prática observada sobre a TV Senado quando aplicada a frequência de 692 MHz no analisador de espectro.

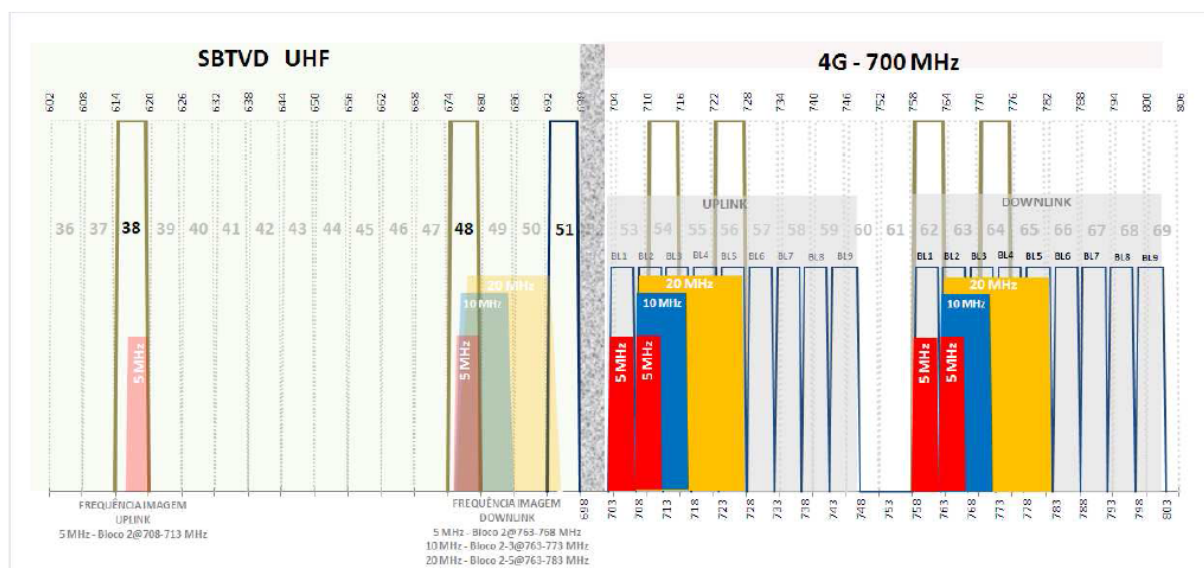


Figura 5.6: Convivência TVD x 4G LTE[13]

Por fim, o filtro pode ser definido como um filtro passa baixa com largura de banda de 692 MHz, de forma a evitar que um possível resquício de sinal LTE presente no canal 51 interfira no sinal de TV. A máscara do filtro é exemplificada na Figura 5.7, de forma ideal, para visualização da banda passante.

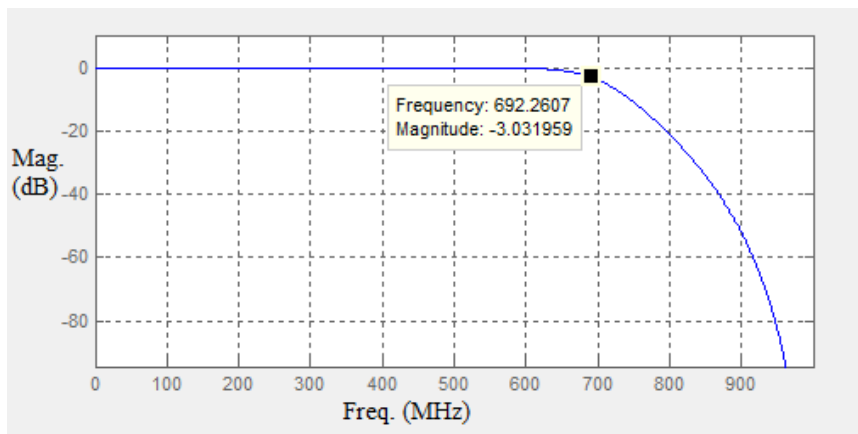


Figura 5.7: Exemplo de Filtro Passa Baixa de Frequência de Corte de 692 MHz

5.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o estudo de interferência por meio de simulação e teste prático, os resultados foram comparados com os testes realizados pela ANATEL. Por fim, foi determinada a máscara de um filtro a fim de mitigar a interferência. No próximo capítulo serão apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

Capítulo 6

Considerações Finais

Este trabalho tem dois focos: realizar a predição de cobertura do sinal LTE nas frequências de 700 e 2500 MHz e estudar a interferência entre o sinal LTE do enlace direto sobre a recepção do sinal de TVD. Para isso, são utilizados a simulação no programa CelPlanner e testes práticos. Os parâmetros do CelPlanner são configurados para formar o cenário mais próximo da realidade possível, as ERB's são posicionadas em coordenadas de estações reais e as antenas recebem modelos usados comercialmente.

Na primeira parte do trabalho, a predição de cobertura permite comparar o sinal em cada valor de frequência para a região do Plano Piloto. Os resultados mostram que a cobertura do sinal em 700 MHz é melhor do que na frequência de 2500 MHz, o que aumenta o potencial de crescimento das redes na frequência mais baixa. Como consequência disso, a frequência de 700 MHz possibilita a redução do número de Estações Rádio Base, reduzindo seu custo de implementação.

Após verificar as vantagens da frequência de 700 MHz, é necessário estudar os efeitos do uso dessa parte do espectro. Portanto a segunda parte do trabalho analisa a interferência entre o sinal LTE e o sinal de TVD, sendo o sinal LTE oriundo do enlace direto e o sinal de TVD recebido pelo terminal de TV. Para isso é utilizado o recurso de assinantes do CelPlanner (representando os terminais de TV), após rodar a predição obtém-se a relação de proteção em cada terminal. Nos testes de campo, por sua vez, é gerado um sinal em 700 MHz direcionado à antena de recepção de TV e são registrados os dados no momento em que ocorre a interferência. Os resultados são comparados aos resultados dos testes realizados pela ANATEL e tidos como semelhantes entre si, permitindo concluir que a maioria dos casos de interferência poderia ser solucionada com o uso de filtros. Assim, sugere-se um filtro passa baixas com largura de banda de 692 MHz.

Com a realização deste trabalho, o potencial de crescimento nas redes de telecomunicações com o uso da faixa de 700 MHz torna-se evidente. O desenvolvimento da sociedade demanda cada vez mais recursos tecnológicos e, conseqüentemente, cada vez mais espaço no espectro de frequências. O uso do LTE permitirá atender com mais qualidade e mais recursos essa demanda social e econômica por dados. Entretanto, a implementação do LTE deve levar em conta a convivência desse serviço com os serviços de televisão para que não haja interferência, a fim de que os clientes de ambos os serviços estejam satisfeitos e as determinações da ANATEL sejam cumpridas.

Por fim, sugere-se alguns trabalhos futuros para dar continuidade a este estudo. São eles:

- Realizar testes de interferência práticos utilizando o filtro com a máscara determinada neste estudo;
- Realizar testes de interferência com o sinal em 700 MHz modulado;
- Realizar testes de interferência com o uso de antena externa para recepção da TV Digital;
- Realizar testes de interferência com o uso de conversor digital externo para a TV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. HODGSON, J. MARTINS, J. RIOS. Análise de Utilização do Espectro de 700 MHz. Etapa II. Campinas: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD); Setembro 2011. PD.33.10.63A.0051A-RT01-AA.

[2] Ministério das Comunicações: História da Telefonia. Acessado em Março 2015. Disponível em:

< <http://www.mc.gov.br/o-ministerio/44-historia-das-comunicacoes/22463-historia-da-telefonias> >

[3] C. E. A. ALVES. Um Estudo Sobre o Uso da Telefonia Celular Nas Classes De Baixa Renda. PUC-Rio. Certificação Digital No 0310622/CA.

[4] ANATEL. Resolução No 544. Agosto 2010.

[5] A. GOLDSMITH. Wireless Communications, 1.ed. Cambridge University Press, 2005. ISBN-13: 978-0-521-83716-3

[6] R. HODGSON, M. MANHÃES, J. RIOS. Análise de Utilização do Espectro de 700 MHz. Etapa I. Campinas: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD); Outubro 2011. PD.33.10.63A.0052A-RT01-AA.

[7] ITU. IMT Advanced. Acessado em Abril 2015.

[8] 3GPP. LTE Advanced. Acessado em Junho 2015.

[9] N. SOLTANI. Comparison of Single-Carrier FDMA vs. OFDMA as 3GPP Long-Term Evolution Uplink. Projeto EE359. Dezembro, 2009.

[10] 3GPP. LTE. Acessado em Junho 2015.

[11] L. KOROWAJCZUK. LTE, WIMAX, and WLAN network design, optimization, and performance analysis. 1.ed. John Wiley & Sons Ltd, 2011. ISBN 978-0-470-74149-8

[12] H. HOLMA; A. TOSKALA. LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. 1.ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2009. ISBN 978-0-470-99401-6

[13] ANATEL. Proposta de submissão à Consulta Pública do 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 608 MHz a 806 MHz. 055/2014-GCRZ. Abril 2014.

[14] ANATEL. Proposta de Regulamento sobre condições de convivência entre o serviço de radiodifusão de sons e imagens do SBTVD e serviços de telecomunicações operando na faixa de

698 MHz a 806 MHz. 76/2014-GCMB. Julho 2014.

[15] S. R. SAUNDERS; A. A. ZAVALA. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2 Ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007. ISBN 978-0-470-84879-1

[16] ITU. ITU-R Recommendations. Acessado em Junho 2015.

[17] Commscope. Product Catalog. Acessado em Junho 2015. Disponível em:
< <http://www.commscope.com/Product-Catalog/> >

[18] ANATEL. Relatório de Teste de Campo de Convivência do LTE na faixa de 700 MHz com ISDB-T. Abril 2014.