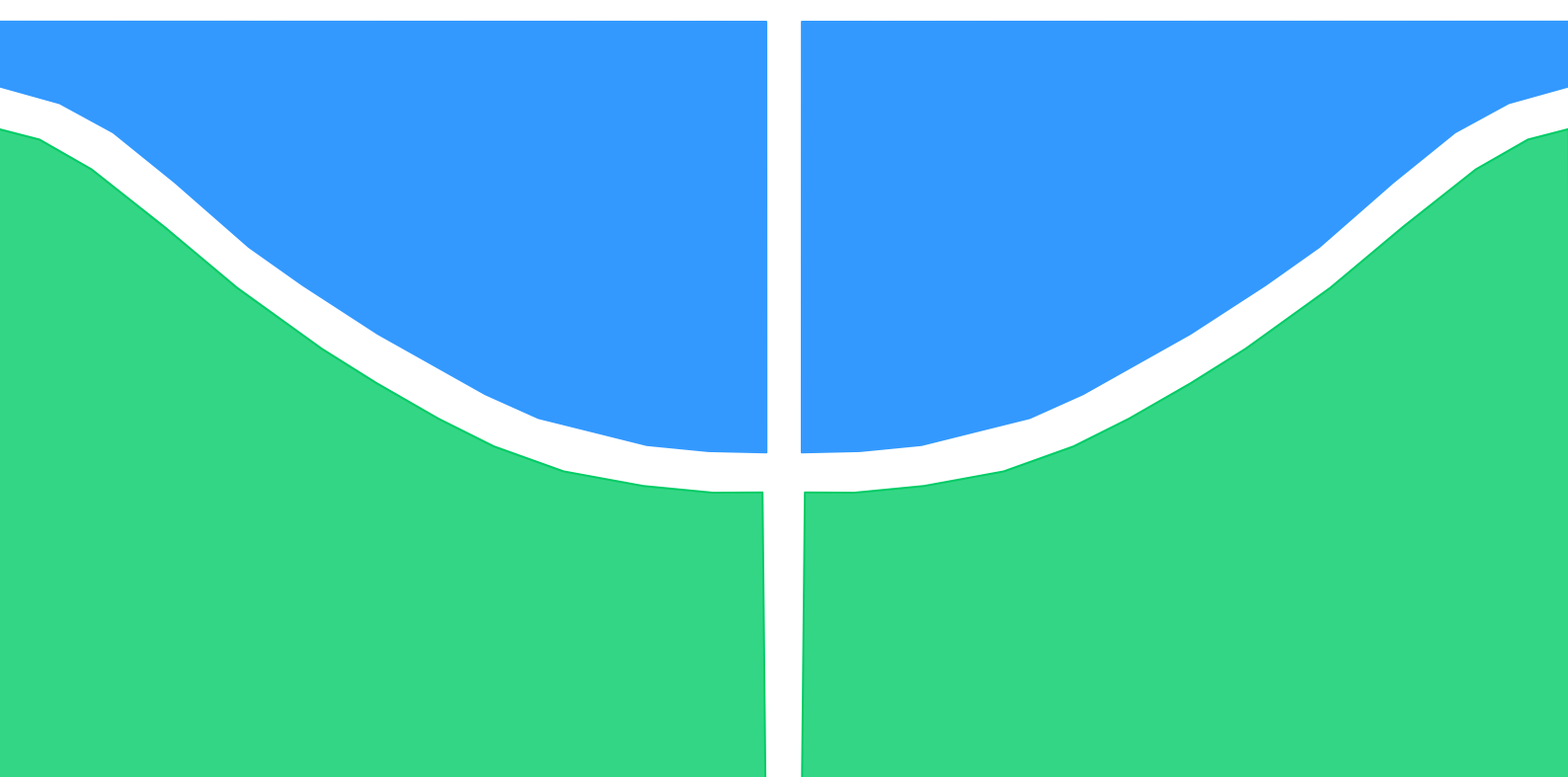




TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Proposta de otimização para a rede LTE 2.5 GHz Banda 38 no Distrito Federal

Carlos Eduardo de Moraes Leal

Brasília, Julho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Proposta de otimização para a rede LTE 2.5 GHz Banda 38 no Distrito Federal

Carlos Eduardo de Moraes Leal

*Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Redes de Comunicação*

Banca Examinadora

Prof. Ugo Silva Dias, Dr., ENE/UnB
Orientador

Prof. Georges Daniel Amvame Nze, Dr., ENE/UnB
Examinador

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

Dedicatória(s)

Dedico este trabalho a Deus, meus pais, minha família, a minhas avós Luzia (in memoriam) e Iraci (in memoriam) e a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente com a conclusão deste curso.

Carlos Eduardo de Moraes Leal

Agradecimentos

Aos meus pais, Maria Eleusa e José Carlos, que foram meus apoiadores incansáveis e sustentáculos imprescindíveis nessa árdua jornada da graduação.

A todos os meus professores, por serem fonte inesgotável de sabedoria e, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Ugo Silva Dias, que teve grande paciência e me ofertou uma gama única de oportunidades com a realização deste trabalho.

À Elyda, que me incentivou enormemente durante os momentos mais conturbados da minha vida acadêmica.

Aos meus colegas de graduação, por conseguirem fazer cada dia nessa Universidade, um dia inesquecível.

À Universidade de Brasília, por oferecer suas dependências para que a minha formação ocorresse com a excelência que lhe é característica. Foi um prazer inenarrável fazer parte de uma instituição de tamanho porte.

A todos os meus grandes amigos e familiares, especialmente meus padrinhos e madrinhas, que me proporcionaram momentos únicos e muita sabedoria durante esse percurso.

Carlos Eduardo de Moraes Leal

RESUMO

A tecnologia LTE está em desenvolvimento constante atualmente e deve ser alvo de aprimoramento intenso ainda por diversos anos, especialmente no Brasil, e o presente projeto foi idealizado a partir desse fato. Ele apresenta a predição de cobertura atual da rede LTE 2.5 GHz Banda 38 em Brasília, feita com o auxílio da ferramenta computacional CelPlanner. Foi realizada uma análise criteriosa da predição apresentada, levando-se em consideração, além da análise em si, fatores como as estratégias comerciais da empresa que se dispôs a fornecer sua rede para os estudos: a SKY Brasil Serviços LTDA. Ao final da análise, foi escolhida uma região para receber a otimização e, então, foi apresentada uma proposta de otimização, com base em otimização lógica, para a região. A proposta foi aplicada e os resultados obtidos revelam a viabilidade de execução do projeto em ambiente real.

ABSTRACT

The LTE technology is in constant development nowadays and it may go through intense enhancement for many years, especially in Brazil and this project was designed under this fact. It features the current coverage for LTE 2.5 GHz Band 38 in Brasília, made with the help of CelPlanner, a computational tool. A critireous analysis of the coverage was performed, taking under consideration various factores besides the analysis itself, like business strategy of the company that offered it network for the studies: SKY Brasil Serviços LTDA. At the analysis end, a region was chosen to receive the optimization and then, an optimization alternative, based on logical optimization, was presented for that region. The alternative was applied and the results show the project execution viability on a real scenario.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.1.1	LTE no Brasil	2
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Estrutura do Texto.....	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	Introdução ao LTE	5
2.2	Bandas de Frequência	6
2.3	Arquitetura LTE	7
2.4	Gerenciamento de Mobilidade	9
2.5	<i>LTE-Advanced</i>	9
2.6	Planejamento da Rede	10
2.7	Conclusão.....	Erro! Indicador não definido.
3	METODOLOGIA	12
3.1	Delimitação do Tema	12
3.2	Propagação de Sinal em Radiofrequência.....	12
3.3	Balanceamento de Enlace	13
3.4	Padrões de Perda por Propagação.....	13
3.4.1	Modelo Okumura-Hata.....	14
3.4.2	Modelo Cost 231-Hata	15
3.5	Desvanecimento em Pequena Escala	15
3.6	Ferramenta de Simulação	16
3.6.1	Configurações utilizadas para o LTE 2.5 GHz	16
3.7	Conclusão.....	Erro! Indicador não definido.
4	ANÁLISES E RESULTADOS.....	26
4.1	Predição de cobertura do Distrito Federal	26
4.2	Processo de Otimização e Análise	28
4.3	Proposta de Otimização.....	30
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	35
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
	ANEXO I – Tabela de eNodeBs.....	38
	Anexo II – Cobertura de cada Região Administrativa.....	45

LISTA DE FIGURAS

1.1	Crescimento do tráfego de voz e dados entre o terceiro bimestre de 2010 e o terceiro bimestre de 2015 [17].....	2
1.2	Distribuição de acessos por tecnologia no Brasil. [16]	3
2.1	Eficiência espectral das duas versões do LTE [bits/s/Hz]. [3]	5
2.2	Desempenho das principais tecnologias de terceira e quarta geração. [3]	6
2.3	Bandas de Frequência do LTE. [3]	7
2.4	Arquitetura da rede <i>LTE</i> . [3]	7
2.5	Especificações do 3GPP para a tecnologia LTE. [1]	9
3.1	Relação entre a distância e a perda no espaço livre. [3]	14
3.2	Primeiras configurações do sistema.	17
3.3	Diretórios da base de dados da ferramenta.	17
3.4	Configuração do quadro TDD. [13]	18
3.5	Configuração dos subquadros especiais do TDD. [13]	19
3.6	Configurações de rádio das eNodeBs.	19
3.7	Configuração do modelo Cost 231-Hata.	20
3.8	Configuração do serviço oferecido.	20
3.9	Configurações do ambiente.	21
3.10	Configurações do equipamento do usuário	22
3.11	Configuração de uma das células do sistema.	23
3.12	Diagrama de irradiação da antena Tongyu TYDA-2616D4T6. [21]	23
3.13	Janela de seleção de antenas e diagrama de irradiação.	24
3.14	Balanceamento de enlace de uma célula.	25
4.1	Mapa morfológico do Distrito Federal com o posicionamento de todas as <i>eNodeBs</i>	26
4.2	Predição de cobertura da rede LTE 2.5 GHz banda 38 do Distrito Federal.	27
4.3	Níveis de intensidade de sinal.	27
4.4	Predição de cobertura atual do Gama.	29
4.5	Área de cobertura das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6.	31
4.6	Área de cobertura das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6 após a otimização	31
4.7	Área de cobertura da eNodeB DFGAM7	32
4.8	Área de cobertura da eNodeB DFGAM7 após a otimização	32
4.9	Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal antes da otimização na região das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6.	33
4.10	Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal após a otimização na região das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6.	33
4.11	Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal antes da otimização na região da eNodeB DFGAM7.	33
4.12	Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal após a otimização na região da eNodeB DFGAM7.	34
II.1	Predição de cobertura em Águas Claras.	45
II.2	Predição de cobertura em Ceilândia.	45
II.3	Predição de cobertura no Guará, Candangolândia e Núcleo Bandeirante.	46
II.4	Predição de cobertura no Lago Norte.	46
II.5	Predição de cobertura no Lago Sul.	47
II.6	Predição de cobertura no Plano Piloto.	47
II.7	Predição de cobertura no Paranoá.	48
II.8	Predição de cobertura no Park Way.	48
II.9	Predição de cobertura em Recanto das Emas.	49
II.10	Predição de cobertura em Samambaia.	49
II.11	Predição de cobertura em Sobradinho.	50
II.12	Predição de cobertura no Sudoeste.	50
II.13	Predição de cobertura em Taguatinga.	51
II.14	Predição de cobertura em Valparaíso.	51

LISTA DE TABELAS

4.1	Proposta de otimização para a região do Gama	31
I.1	Relação de células do Distrito Federal.....	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

L_{dB}	Perda por propagação	[dB]
f_{MHz}	Frequência de operação	[Hz]
d_{km}	Distância entre antena transmissora e receptora	[m]
f_c	Frequência central da portadora	[Hz]
h_b	Altura da antena transmissora em relação ao solo	[m]
h_m	Altura da antena do terminal móvel em relação ao solo	[m]
L	Máxima perda de enlace de descida/subida	[dB]
P_{TX}	Potência de transmissão	[dBm]
G_{TX}	Ganho da antena transmissora	[dBi]
L_{TX}	Perdas de transmissão	[dB]
SNR_R	Relação sinal-ruído requerida	[dB]
S_{RX}	Sensibilidade requerida na recepção	[dB]
G_{RX}	Ganho da antena receptora	[dBi]
L_{RX}	Perdas na recepção	[dB]
G_{DV}	Ganho de diversidade	[dBi]
M	Margem de desvanecimento	[dB]

Siglas

<i>2G</i>	<i>Second Generation</i>
<i>3G</i>	<i>Third Generation</i>
<i>3GPP</i>	<i>Third Generation Partnership Project</i>
<i>4G</i>	<i>Fourth Generation</i>
<i>ANATEL</i>	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
<i>AWGN</i>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<i>eNodeB</i>	<i>Evolved Node B</i>
<i>EPC</i>	<i>Evolved Packet Core</i>
<i>ERB</i>	<i>Estação Rádio Base</i>
<i>ET</i>	<i>Electrical Tilt</i>
<i>E-UTRAN</i>	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<i>FDD</i>	<i>Frequency Division Duplex</i>
<i>GSM</i>	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<i>HSPA</i>	<i>High Speed Packet Access</i>
<i>HSS</i>	<i>Home Subscription Server</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>IMT</i>	<i>International Mobile Telecommunication</i>
<i>IP</i>	<i>Internet Protocol</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>
<i>LOS</i>	<i>Line-of-Sight</i>
<i>LTE</i>	<i>Long Term Evolution</i>
<i>LTE-A</i>	<i>Long Term Evolution Advanced</i>
<i>MIMO</i>	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<i>MME</i>	<i>Mobility Management Entity</i>
<i>MT</i>	<i>Mechanical Tilt</i>
<i>OFDMA</i>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
<i>PGW</i>	<i>Packet Data Network Gateway</i>

<i>QAM</i>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>
<i>QPSK</i>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
<i>SC-FDMA</i>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
<i>SGW</i>	<i>Serving Gateway</i>
<i>TCP</i>	<i>Transfer Control Protocol</i>
<i>TDD</i>	<i>Time Division Duplex</i>
<i>UE</i>	<i>User Equipment</i>
<i>UICC</i>	<i>Universal Integrated Circuito Card</i>
<i>UMTS</i>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
<i>WiMAX</i>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta considerações gerais preliminares relacionadas ao contexto do trabalho, aos seus objetivos e, por fim, aos assuntos abordados ao longo do mesmo.

1.1 Contextualização

O advento da comunicação sem fio motivou uma série de mudanças na maneira como as pessoas se comunicam. É possível traçar uma linha sucessória de tecnologias que se inicia com o desenvolvimento do conceito celular pelos laboratórios Bell na década de 1960, passando pelo primeiro sistema de telefonia celular comercializada nos Estados Unidos em 1983, que foi um serviço analógico chamado de Sistema Avançado de Telefone Celular, do inglês *Advanced Mobile Phone Service* ou *AMPS*, e chegando na tecnologia de sistemas de comunicação celular sem fio mais avançada atualmente: a tecnologia *LTE*, do inglês *Long Term Evolution* [4] [2].

Durante essa evolução, o foco dos investimentos foi sendo alterado constantemente, conforme a mudança no tráfego da rede ocorria. Com relação a implementação das primeiras tecnologias de comunicação celular, o foco era, notadamente, na robustez dos pacotes de voz que trafegavam pela rede. Desde o começo dessa década, entretanto, houve um crescimento exponencial do tráfego de pacotes de dados, como a Figura 1.1 ilustra. Nos últimos trimestres de 2010, o tráfego de dados já estava bastante superior, se comparado ao de voz, e continuou crescendo, chegando a valores acima de 4.500 PB em 2015, considerando o tráfego do enlace de subida e descida somados [17].

Tendo esse cenário em vista, as tecnologias atuais precisam prover a vazão necessária para essa demanda crescente. Foi por causa disso que o *IEEE*, do inglês *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, iniciou a criação, por volta do início dos anos 2000, de um novo padrão de tecnologia sem fio. Este novo padrão está especificado dentro da família 802 – 802.16 - do *IEEE* e foi batizado de *WiMAX*, do inglês *Worldwide Interoperability for Microwave Access*. Ele foi baseado no modelo do padrão *WLAN*, do inglês *Wireless Local Area Network*, utiliza a multiplexação ortogonal *OFDM* (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) e descreve como deve ser modelada uma interface de rede sem fio para redes metropolitanas [3].

Após o desenvolvimento do *WiMAX*, o *3GPP*, do inglês *3rd Generation Partnership Project*, criou o padrão de tecnologia celular conhecido como *LTE* que, assim como o *WiMAX* e o *WLAN*, também utiliza a multiplexação ortogonal *OFDM*, mas com diferenças nos esquemas de múltiplo acesso para o enlace de descida e de subida, sendo utilizado o *OFDMA* (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) e o *SC-FDMA* (*Single Carrier Frequency-Division Multiple Access*), respectivamente. Esses sistemas fazem com que a capacidade da rede seja otimizada e reduz a interferência na mesma [3].

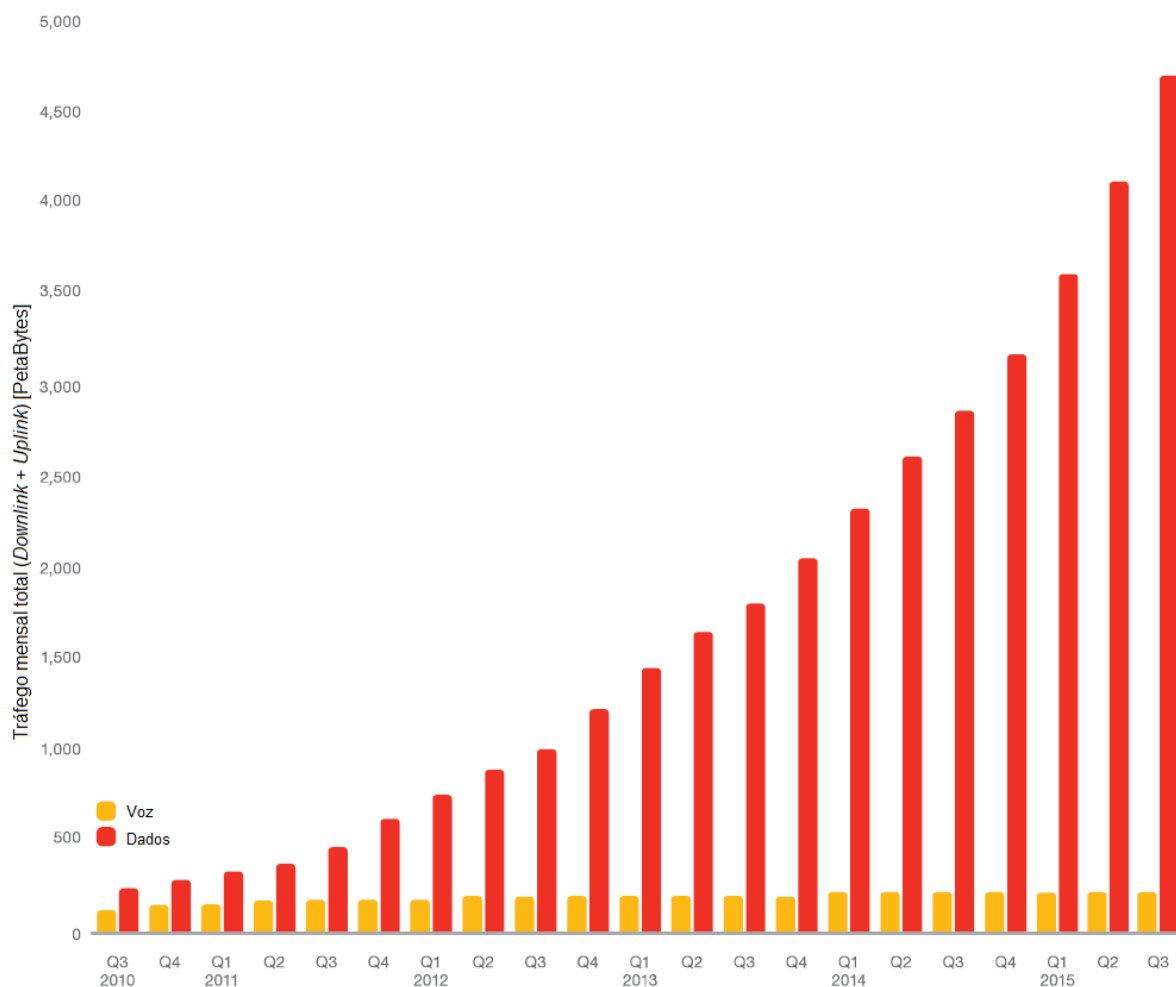


Figura 1.1 - Crescimento do tráfego de voz e dados entre o terceiro bimestre de 2010 e o terceiro bimestre de 2015 [17].

1.1.1.1 LTE no Brasil

Na atualidade, a rede *LTE* é a única a operar comercialmente como serviço de Internet móvel de quarta geração no Brasil. A primeira operadora a trabalhar comercialmente com essa tecnologia foi a que é objeto de estudo do presente projeto, realizando sua primeira atividade com serviço de Internet banda larga em 2011. A disponibilização do serviço para dispositivos móveis se deu a partir de 2012, depois que a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) realizou um leilão que visou a concessão dos espectros da frequência de 2.5 GHz através de uma licitação publicada em edital [9] [15].

A ocorrência da licitação se deu em um período de grande preocupação com a estrutura de rede do país que seria a sede da Copa do Mundo, realizada em 2014. Tendo isso em vista, algumas regras foram impostas para que a concessão fosse garantida à operadora. As principais eram: estabelecer, até o fim de 2013 a cobertura do LTE em cada cidade que sediará partidas do Mundial; garantir que todas as cidades brasileiras com mais de 200.000 habitantes tenham cobertura até o final de 2015 e fornecer o serviço em áreas rurais utilizando o espectro de frequência de 450 MHz [14].

Recentemente, a Anatel realizou mais um leilão de frequências para a o LTE que foi concluído em 2015. Esse segundo leilão ocorreu para o espectro de 700 MHz e foi possível graças à migração do sistema de transmissão analógico de TV para o digital. Com o sinal analógico sendo abandonado aos poucos pelas operadoras de TV, está acontecendo a liberação da frequência, processo que é esperado durar até meados de 2019.

No Brasil, o serviço de banda larga fixa é ofertado de diversas maneiras, a partir da utilização de diferentes tecnologias [14]. Os principais meios são:

- Satélite – Tecnologia *DTH*, do inglês *Direct To Home*;
- Meios físicos confinados – *ATM*, do inglês *Asynchronous Transfer Mode*, *Cable Modem*, *Ethernet*, fibra, *FR*, do inglês *Frame Relay*, *xDSL*, termo genérico para os serviços de *Digital Subscriber Lines*, *PLC*, do inglês *Power Line Communication* e o acesso híbrido de Cabo Coaxial e Fibra, também conhecido como *HFC*;
- Ondas de rádio terrestre – *LTE*, *WiMAX*, *Spread Spectrum*, ou Espectro Estendido, *FWA*, do inglês *Fixed Wireless Access* e *MMDS*, do inglês *Multichannel Multipoint Distribution System*.

Todos os serviços acima listados tiveram sua distribuição de acessos no Brasil estudada pela Anatel, o que pode ser verificado na Figura 1.2. A tecnologia *LTE*, por ter sido implementada há pouco tempo no país, ainda não conta com números tão expressivos na região brasileira. Isso é reflexo, também, da cobertura do sinal *LTE*, que está concentrada nas cidades de maior população devido às restrições impostas pela Anatel em sua implantação.

Se a comparação da cobertura da tecnologia é feita com relação ao território total do país, é possível chegar à conclusão que o acesso à tecnologia é bastante restritivo. Entretanto, percebe-se que a tecnologia está crescendo nos últimos meses. E, com a utilização de uma nova faixa de frequência, seu crescimento tende a ser ainda maior nos próximos anos.

Tecnologia	Outubro (2015)	Novembro (2015)	Dezembro (2015)	Janeiro (2016)	Fevereiro (2016)	Março (2016)	Abril (2016)
ATM	230.400	228.378	230.976	225.549	224.386	223.403	222.456
Cable Modem	8.209.612	8.233.628	8.253.655	8.259.533	8.330.753	8.366.495	8.394.693
DTH	583	4	5	130	215	1.226	333
ETHERNET	317.809	324.907	321.521	325.351	334.526	348.857	348.525
FR	19.708	19.303	19.010	18.747	18.722	19.076	18.908
FWA	83.667	85.160	79.695	81.963	80.505	86.555	84.600
Fibra	1.255.010	1.268.706	1.292.023	1.302.093	1.315.003	1.384.647	1.410.654
HFC	28.160	30.005	29.144	30.304	29.960	26.929	28.170
LTE	285.269	297.638	303.703	313.085	317.058	319.928	327.516
MMDS	2.399	2.427	2.074	2.156	2.587	2.507	2.691
PLC	974	509	262	384	220	384	170
SATELITE	67.315	67.357	67.189	67.092	67.663	67.755	68.027
Spread Spectrum	1.641.693	1.535.832	1.611.387	1.531.988	1.587.592	1.628.444	1.627.101
WIMAX	14.564	15.118	15.783	15.647	17.351	14.382	16.168
xDSL	13.360.882	13.325.009	13.256.051	13.275.049	13.286.607	13.309.862	13.335.224
TOTAL	25.518.045	25.433.981	25.482.478	25.449.071	25.613.148	25.800.450	25.885.236

Figura 1.2 - Distribuição de acessos por tecnologia no Brasil [16].

1.2 Objetivos

O presente projeto tem como objetivo a simulação e análise da rede de telefonia móvel de quarta geração *LTE* na faixa de 2.5 GHz Banda 38 no Distrito Federal. Além disso, será feita uma proposta de otimização desta rede na região, ou regiões, que apresentarem condições para tal, respeitando o estudo a ser realizado dentro desse manuscrito e interesses comerciais dos detentores dos direitos de utilização e comercialização da faixa especificada.

1.3 Estrutura do Texto

O capítulo 2 aborda os conceitos teóricos necessários para a melhor compreensão e produção do projeto. São apresentados os principais conceitos da tecnologia de quarta geração *LTE*, como a arquitetura e suas bandas de frequência e conceitos de radiofrequência, necessários para o entendimento do processo de otimização propriamente dito.

No capítulo 3 é apresentado o *software* computacional *CelPlanner* utilizado para a predição de cobertura e otimização da rede atual. Ademais, é mostrada a parametrização utilizada pelos detentores dos direitos de utilização da faixa de frequência em estudo, as excepcionalidades de tal rede e todas as configurações que resultaram e justificaram a predição.

O capítulo 4 descreve o processo de otimização utilizado, os resultados obtidos através das simulações que justificam a conclusão do projeto, bem como a análise para o cenário proposto.

As conclusões são exibidas no capítulo 5, o que encerra a apresentação do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados todos os conceitos teóricos dos temas relevantes ao trabalho, para melhor compreensão do projeto.

2.1 Introdução ao LTE

Como o próximo passo da linha de evolução das tecnologias de rede celular, após a implementação do padrão *UMTS*, do inglês *Universal Mobile Telecommunications System*, que representa a terceira geração (3G), a tecnologia *LTE* foi padronizado pelo 3GPP com o intuito de aprimorar as tecnologias anteriores como um todo, além de manter compatibilidade com seus antecessores.

Essa interoperabilidade do *LTE* proporciona às operadoras de telefonia celular a migração das tecnologias anteriores para a mais atual sem que seja necessário o rompimento com as redes já existentes. Comercialmente, isso simplificou a substituição de redes e fez com que o mercado não tivesse que se readaptar a algo completamente novo.

Além do objetivo acima listado, o *LTE* foi concebido para alcançar algumas metas à época. Dentre as principais estavam [3]:

- Largura de banda espectral entre 1.4 e 20 MHz;
- Latência menor do que 5 ms para pacotes pequenos;
- Alta mobilidade (até 120 km/h);
- Alcance de célula de até 100 km;
- Operação em múltiplas bandas e largura de banda escalável;
- Modos *full-duplex*: *FDD* (*Frequency Division Duplex*) e *TDD* (*Time Division Duplex*). Os conceitos das técnicas de duplexação serão explicadas na próxima sessão;
- Eficiência espectral de três a quatro vezes melhor, no enlace de descida, do que um dos padrões de terceira geração, *HSPA* (*High Speed Packet Access*), e de duas a três vezes melhor no enlace de subida. A Figura 2.1 ilustra o objetivo de eficiência espectral que as tecnologias *LTE* e *LTE-A*, do inglês *Long Term Evolution Advanced*, se propõem a cumprir nos cenários rural, urbano e residencial. Os conceitos sobre *LTE-A* serão discutidos mais à frente nesse capítulo.

ITU spectral efficiency objectives (bit/s/Hz)				
ITU Scenario	Downlink		Uplink	
	LTE	LTE- A	LTE	LTE- A
Indoor Hotspot	3.0	5.0	2.3	4.0
Urban Micro	2.6	3.1	1.8	2.2
Urban Macro	2.2	2.8	1.4	1.8
Rural Macro	1.1	2.6	0.7	2.0

Figura 2.1 - Eficiência espectral das duas versões do LTE [bits/s/Hz] [3].

A tecnologia LTE tem uma larga vantagem comercial em relação aos sistemas anteriores, principalmente se for levado em consideração o fator desempenho. A vazão do enlace de descida pode chegar à taxa de 300 Mbps e a do enlace de subida chega à 75 Mbps. Se esses valores forem comparados com a vazão das tecnologias de terceira geração, o que pode ser verificado na Figura 2.2, infere-se que a melhoria de desempenho foi consideravelmente alta.

	Channel bandwidth (MHz)	Downlink throughput (Mbit/s)	Uplink throughput (Mbit/s)	Symbol duration (μ s)	Maximum multipath delay spread (m)
HSDPA	5	14.4	0.384	0.26	781
HSUPA	5	14.4	5.75	0.26	781
HSPA+	5	26	11.5	0.26	781
LTE	20	300	75	66.67	5000

Figura 2.2 - Desempenho das principais tecnologias de terceira e quarta geração [3].

É importante frisar que os valores apresentados apenas são atingidos em condições especiais e eles têm uma relação baixa se comparados com os valores reais presenciados nas redes atuais, mas a conclusão feita com essa comparação é válida, também, para os resultados práticos [3].

Existem ainda outras características da tecnologia que são relevantes em seu estudo. Entre elas, podemos citar a possibilidade de utilização de múltiplas antenas em um sistema, comumente conhecido como *MIMO*, do inglês *Multiple-Input Multiple-Output*, que visa a melhoria de performance e capacidade do sistema como um todo, obtenção de uma cobertura ampliada e de taxas de vazão mais elevadas. As configurações de *MIMO* padrão para *LTE* são 1x1, 2x2, 4x2 e 4x4, onde o primeiro número representa o número de antenas de transmissão e o segundo, o número de antenas de recepção utilizados [11].

Por fim, o mecanismo de controle de potência em um sistema *LTE* pode fazer com que o mesmo seja aperfeiçoado em sua capacidade e tenha consumo de energia reduzido. Para isso, essa técnica tenta controlar a potência dos sinais de interesse enquanto limita a interferência no canal. Em suma, essa técnica faz com que, quando se estabelece conexão entre um agente transmissor e um receptor, haja o controle da intensidade de sinal que um transmite para o outro [11].

2.2 Bandas de Frequência

O *3GPP* padronizou, para o *LTE*, bandas de frequência nas quais a tecnologia pudesse ser implementada no mundo todo e as dividiu entre duas técnicas de duplexação: *FDD* e *TDD*. Isso foi possível porque o *LTE* permite uma flexibilização de uso de espectro e de largura de banda para cada canal. Com isso, o *3GPP* também padronizou a largura de banda que cada banda de frequência pode utilizar.

A Figura 2.3 mostra a operação das principais bandas de frequência. Analisando o objeto de estudo do presente manuscrito, a banda 38 é operada em *TDD*, pode utilizar toda a extensão de canais de 37750 a 38249, ou seja, ao utilizar um canal dessa extensão, a portadora estará escolhendo a sua frequência central para operar. Este canal também é chamado de *EARFCN*, do inglês *e-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number* (o termo *E-UTRA* vem do inglês *Evolved Universal Terrestrial Radio Access* e será esclarecido mais a frente).

Band	Downlink (MHz)		Channel range	Uplink (MHz)		Channel range	Duplex	Bandwidth (MHz)						Usage areas
	From	To		From	To			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	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

Figura 2.3 - Bandas de Frequência do LTE [3].

É possível também verificar as faixas de frequência dos enlaces de descida e de subida de cada banda. No caso da banda 38, a faixa de frequência de operação no enlace de descida e de subida vai de 2570 MHz a 2620 MHz.

2.3 Arquitetura LTE

Já foi dito que o *LTE* foi concebido para ter contextualização com a tecnologia já existente da terceira geração. A diferença consiste na simplificação da arquitetura, mantendo alguns elementos da estrutura do *3G*. O novo sistema foi proposto com base em um bloco principal chamado de *EPS*, do inglês *Evolved Packet System*, ou Sistema de Pacotes Evoluído, que é subdividido em dois elementos-chave: o *e-UTRAN*, onde se concentram os equipamentos do usuário, ou *UE*, do inglês *User Equipment*, e a estação base, que é chamada de *eNodeB*, ou *eNB*, do inglês *Evolved Node B*; e o *EPC*, do inglês *Evolved Packet Core*, onde são encontrados os elementos de acesso à rede. A Figura 2.4 ilustra os componentes da arquitetura *LTE*.

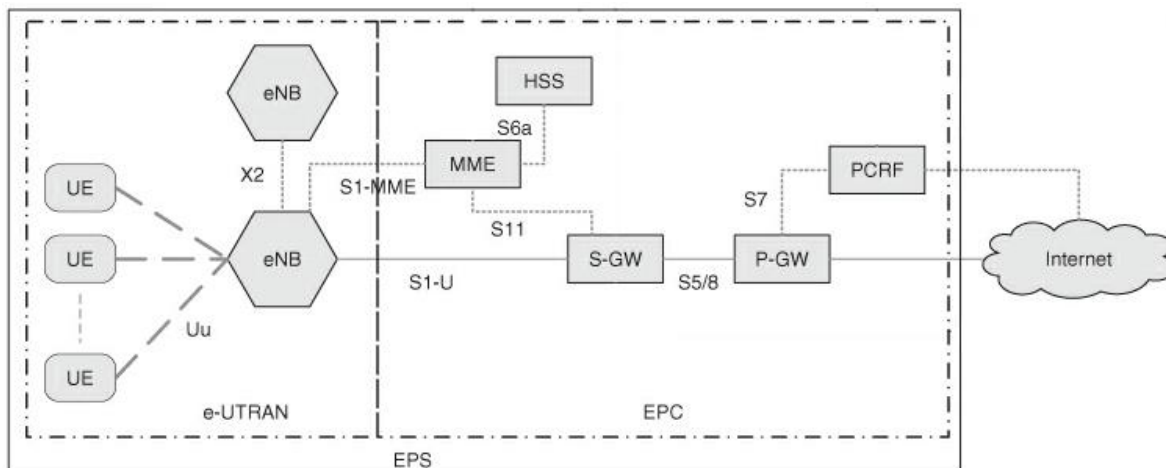


Figura 2.4 - Arquitetura da rede *LTE* [3].

O equipamento do usuário (*UE*) tem por função principal fornecer ao cliente o acesso à rede LTE, e mantê-lo nela de acordo com as situações do ambiente, através de um dispositivo de comunicação chamado de Terminal Móvel, ou *MT*, do inglês *Mobile Terminal*. O Terminal Móvel requer o uso de um cartão especial que armazena e controla os dados do serviço de cada usuário. Este cartão é chamado de *UICC Card*, do inglês *Universal Integrated Circuit Card*, comumente conhecido como *SIM (Subscriber Identification Module) Card*.

A *eNodeB* é o elemento de ponta do protocolo de interface aérea e é o primeiro ponto de contato para o Equipamento do Usuário. Dentre suas principais funções estão o gerenciamento de recursos do rádio, conectividade com os elementos do *EPC*, compressão de cabeçalho para lidar com sobrecarga, agendamento do tráfego de pacotes de dados e o gerenciamento dinâmico de recursos para o enlace de descida e de subida. Um aspecto importante da *eNodeB* é a interconexão que ela tem com as *eNodeBs* vizinhas, portanto elas podem trocar informações diretamente entre elas.

Os elementos do segundo bloco, o *EPC*, são os responsáveis por fazer a conexão entre os serviços externos e a rede de dados que trafegam no *LTE*. Existem também algumas interfaces que são muito relevantes e seus conceitos também devem ser explicados. Tais elementos são [3]:

- **Entidade de Gerenciamento de Mobilidade** – O *MME*, do inglês *Mobility Management Entity*, processa a sinalização entre o *UE* e o núcleo da rede. Suas funcionalidades são: gerenciamento de portadora, ou seja, estabelecimento, manutenção e remoção de portadoras e gerenciamento de segurança de conexão entre o *UE* e a rede;
- **Gateway de Serviço** – Do inglês *Serving Gateway*, o *S-GW* faz o roteamento de pacote de dados entre a *e-UTRAN* e o *EPC*. Além disso, é utilizado como apoio local no caso de ocorrência de *handover* entre *eNodeBs* diferentes e de mobilidade entre tecnologias diferentes;
- **Gateway da Rede de Pacote de Dados** – O *PDN-GW*, ou apenas *P-GW*, do inglês *Packet Data Network Gateway*, é responsável pela alocação de IP para o *UE*, o cumprimento das regras de Qualidade de Serviço (*QoS*), roteamento de pacotes de dados entre o *EPC* e *PDNs* externos, além de ser utilizado como apoio para a comunicação com redes não padronizadas pelo *3GPP*, como o *WiMAX*, por exemplo;
- **Servidor de Assinatura Local** – O *HSS*, do inglês *Home Subscriber Server*, é aonde são armazenadas todas as informações de identidade pública e privada do usuário, de localização e variáveis de segurança;
- **Controle de Políticas e Função de Regras de Cobrança** – O *PCRF*, do inglês *Policy Control and Charging Rules Function*, é a função que administra as políticas de *QoS* da rede. Sua função principal é enviar ao *P-GW* quais classes de identificação utilizar para cada perfil de *UE*.
- **Interface Uu** – Interface de rádio entre o *UE* e a *eNodeB*;
- **Interface S1** – Interface que separa a *e-UTRAN* e o *EPC* e é dividido em duas partes: a interface *S1-U*, que carrega o tráfego de dados entre a *eNodeB* e o *S-GW*, e a interface *S1-MME*, que realiza a tarefa de sinalização entre a *eNodeB* e o *MME* e onde são implementadas as funcionalidades de mobilidade, inicialização de *UE* e gerenciamento de usuários;
- **Interface X2** – É a interface que interconecta duas *eNodeBs* diretamente.

2.4 Gerenciamento de Mobilidade

O gerenciamento de mobilidade em *LTE*, comumente chamado de *Handover (HO)*, é o processo no qual ocorre a transição, de modo transparente, de um Terminal Móvel de uma célula para outra. O *handover* pode ser categorizado em dois grupos:

- *Handover* entre sistemas *LTE*;
- *Handover* entre o *LTE* e outros sistemas, sejam eles padronizados pelo *3GPP*, como o *UMTS*, ou não, como o *WiMAX*;

O primeiro tipo de *handover* acontece quando o *UE* se move de uma *eNodeB* para outra. Ele pode ser dar através de duas interfaces: *X2* e *S1*. O primeiro caso ocorre quando essa mobilidade acontece na mesma rede de acesso ao rádio (*RAN*, do inglês *Radio Access Network*) anexada ao mesmo *MME*. Já o segundo caso ocorre quando um *UE* se desloca para a área de outra *eNodeB* que pertence a uma *RAN* diferente anexada a outro *MME*.

Já o segundo tipo de *handover* ocorre quando o *UE* precisa reestabelecer conexão assim que ele se desloca para a área de cobertura de um sistema diferente ao *LTE*. Levando-se em consideração o presente projeto, o tipo de *handover* que ocorre na rede *LTE* 2.5 GHz Banda 38 no Brasil é o primeiro, já que a rede é puramente *LTE*. Outro fato importante a ser levado em consideração é que a operadora que detém os direitos de utilização dessa rede não trabalha com dispositivos celulares (o aparelho utilizado fica estático na residência do cliente), portanto o *handover* só acontece por motivo de saturação de uma determinada célula. Ou seja, caso o aparelho utilizado pela operadora, chamado de *CPE*, do inglês *Costumer Premises Equipment*, perceber que a célula na qual ele está incluído está com intensidade baixa de sinal e que existe uma célula vizinha com intensidade maior, ele irá realizar o *handover* para a segunda célula.

2.5 LTE-Advanced

O trabalho do *3GPP* visando a melhoria da rede de quarta geração fez com que o grupo desenvolvesse a tecnologia que é considerada o próximo passo na evolução do *LTE*: o *Long Term Evolution Advanced*. Portanto, é importante frisar que o *LTE-A* não é uma tecnologia nova, já que herda boa parte das características de seu predecessor. Em termos de padronização, o *LTE* está descrito nos *releases* 8 e 9 e o *LTE-A* nos *releases* 10 e 11, como pode ser observado na Figura 2.5. [1]

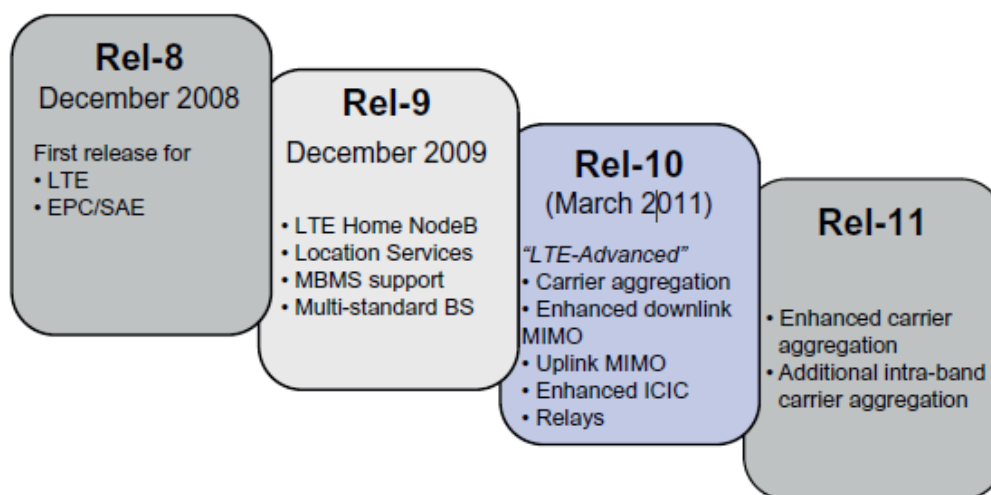


Figura 2.5 - Especificações do 3GPP para a tecnologia LTE [1].

Alguns dos aspectos principais descritos em tais *releases* dizem respeito à maior largura de banda conquistada pela agregação de múltiplas portadoras na tecnologia, além da evolução do uso de técnicas com múltiplas antenas nos enlaces de descida e subida. Essas características foram retificadas na criação do *release* 11.

Um dos objetivos centrais da criação do *LTE-A* é a total conformidade com requerimentos do *IMT-Advanced*, que é o termo utilizado pela *ITU* para tecnologias de rádio de acesso desenvolvidas após o *IMT-2000*. O *IMT-Advanced*, ou *International Mobile Telecommunications-Advanced*, tem como principais requerimentos o suporte para largura de banda mínima de 40 MHz, eficiência espectral máxima de 15 bits/s/Hz no enlace de descida e 6.75 bits/s/Hz no enlace de subida em um cenário real, o que corresponde a uma taxa de 600 e 270 Mbps, respectivamente [1].

Como foi dito anteriormente, a agregação de portadora pode estender a largura de banda de transmissão. Isso pode ocorrer da seguinte forma: múltiplos componentes (em um máximo de cinco) da portadora são agregados e, conjuntamente, utilizados na transmissão para um terminal ou de um terminal. Isso faz com que a seja possível transmitir com largura de banda máxima de 100 MHz.

Por fim, a otimização no uso de múltiplas antenas foi possível graças a expansão da multiplexação espacial ocorrida a partir do *release* 10. Com isso, a tecnologia ganhou suporte para até oito portas de antena e suas camadas correspondentes. Juntamente com o auxílio da agregação de portadora, há a possibilidade teórica de taxa de tráfego de dados de até 3 Gbps.

2.6 Planejamento da Rede

O procedimento de planejamento de uma rede celular tem por objetivo principal a obtenção de maximização da cobertura com menos equipamentos possíveis, mas tendo em vista o fornecimento de tráfego que atenda as demandas dos usuários. Existem diversos fatores que compõem a planejamento de uma rede celular como a rede *LTE*. Entre eles estão a obtenção de dados importantes como a região de cobertura almejada, o número total de usuários e a forma como eles estão distribuídos dentro dessa região, a qualidade do serviço (*QoS*, do inglês *Quality of Service*) requisitada, características dos componentes que irão integrar a rede, entre outros [8].

O planejamento pode ser descrito por quatro métodos básicos que auxiliam na forma como os procedimentos serão abordados. São eles:

- *Model Tuning*, ou adaptação do Modelo de Propagação, onde será feito um ajuste fino das características do modelo de propagação teórico utilizado;
- Localização das *eNodeBs*, onde é definida a localização das estações base que melhor cumpre as necessidades do projeto;
- Dimensionamento, que define o escopo total do projeto;
- Configuração dos parâmetros do sistema.

Quando se segue essa metodologia, pode-se esperar que o projeto terá todas as bases para que tenha sucesso em sua implementação.

2.7 Síntese do Capítulo

Todos os conceitos teóricos necessários para o entendimento da tecnologia LTE e o planejamento de tal rede foram expostos durante todo esse capítulo. Os métodos de predição e configurações realizadas durante a execução do projeto serão apresentados no capítulo seguinte.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a metodologia utilizada no projeto para configuração e predição do cenário da rede LTE no Distrito Federal, bem como a forma como a otimização será abordada.

3.1 Delimitação do Tema

O presente trabalho apresenta uma proposta de otimização em radiofrequência da tecnologia LTE, com foco na frequência de 2.5 GHz e especificamente na banda 38. Notadamente, o projeto aborda todos os aspectos da tecnologia *LTE*, apresenta a situação dela no contexto brasileiro e se propõe a otimiza-la na região do Distrito Federal.

Por questões comerciais, de estudos socioeconômicos e estratégicos da SKY Brasil Serviços LTDA., foi especificada a Região Administrativa do Gama como foco do processo de otimização apresentado aqui. É importante frisar que a estratégia apresentada não se restringirá à região do Gama, ou seja, o mesmo procedimento pode ser aplicado para a otimização da rede *LTE* de qualquer outro lugar, já que a tecnologia está difundida, e se expandindo, por todo o Brasil.

Com o auxílio da ferramenta computacional de simulação *CelPlanner*, a primeira etapa da metodologia compreende o posicionamento de todas as *eNodeBs* existentes na rede do Distrito Federal atualmente, a realização das configurações de todos os elementos de cada *eNodeB*, do tipo de serviço de banda larga é oferecido para a tecnologia, dos equipamentos do usuário (*CPEs*), fatores de perda por penetração, ligados ao ambiente do local, e, por fim, os fatores do modelo de propagação escolhido para a predição.

A segunda etapa do processo é a realização da predição da cobertura da rede, feita pelo *CelPlanner*. Essa etapa é de vital importância para que, com seu resultado, se possa estudar as melhores formas de abordagem da otimização em si, além de auxiliar na detecção das regiões na quais a otimização se faz mais necessária.

Com a cobertura concluída, o último passo é a análise das possibilidades de melhoria da rede apresentada na predição. Existem diversas formas de elaborar a otimização e neste projeto será escolhida uma delas, fato que será justificado mais à frente neste capítulo.

3.2 Propagação de Sinal em Radiofrequência

Ondas de rádio, assim como outras formas de radiação eletromagnética, se propagam pelo ar em linha reta. Comunicação a longa distância depende da capacidade das ondas de se propagarem através de diversos obstáculos, portanto as propriedades do caminho pelo qual a onda está viajando determinam a intensidade e a qualidade do sinal recebido. Diversos fenômenos que afetam a onda, seja construtiva ou destrutivamente, podem acontecer, com a reflexão, refração e difração. Portanto, é de suma importância para quem está modelando a rede, saber previamente quais são as características de propagação de rádio do ambiente [19].

O primeiro passo para o entendimento das características de propagação é a realização de estudos morfológicos e topográficos da região onde a tecnologia irá ser implementada e o estudo de balanceamento de enlace.

3.3 Balanceamento de Enlace

O balanceamento de enlace, do inglês *Link Budget*, pode ser entendido como o cálculo da perda de propagação máxima que o sistema deve suportar para que os usuários localizados nas bordas das células reúnam condições mínimas para o uso de tal sistema. Com esse cálculo, é possível definir o raio de cada célula, bem como a área de cobertura, fazendo com que a estimativa do número de eNodeBs necessários para que o sistema seja coberto em uma determinada região seja possível.

Dentre os parâmetros que o balanceamento de enlace leva em consideração, os principais são a potência de transmissão, os ganhos das antenas, e todos os tipos de perdas possíveis de ocorrer quando a onda se propaga a partir do transmissor até o receptor. Além disso, existe uma margem de desvanecimento que garante que os usuários das bordas das células consigam utilizar o sistema.

Basicamente, o balanceamento de enlace, em dB , é dado pela Equação 3.1 [8]:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - SNR_R - (S_{RX} + G_{RX}) - L_{RX} + G_{DV} - M \quad (3.1)$$

em que:

- L - Máxima Perda de Enlace de Descida/Subida;
- P_{TX} - Potência de Transmissão [dBm];
- G_{TX} - Ganho da Antena Transmissora [dBi];
- L_{TX} - Perdas na Transmissão [dB];
- SNR_R - Relação Sinal Ruído Requerida [dB];
- S_{RX} - Sensibilidade Requerida na Recepção [dB];
- G_{RX} - Ganho da Antena Receptora [dBi];
- L_{RX} - Perdas na Recepção [dB];
- G_{DV} - Ganho de Diversidade [dBi];
- M - Margem de Desvanecimento [dB]

Entretanto, a Equação 3.1 pode ser apresentada de uma forma mais simples, como o cálculo para a potência total recebida dentro do sistema. Essa forma mais simples é mostrada na Equação 3.2, onde as potências são dadas em dBm , os ganhos e as perdas são dados em dB [5]:

$$\text{Potência recebida} = \text{Potência transmitida} + \text{Ganhos} - \text{Perdas} \quad (3.2)$$

Nas próximas sessões são explicados alguns padrões de perda por propagação e distribuições de desvanecimento, definido o modelo e os parâmetros que serão utilizados no balanceamento de enlace desse projeto.

3.4 Padrões de Perda por Propagação

A perda por propagação da maior parte dos sistemas teóricos utiliza, como princípio, o modelo de perda no espaço livre. Tal modelo tem uma correlação direta com a distância, como pode ser percebido pela Equação 3.3 e a Figura 3.1 [5].

$$L_{dB} = 32,444 + 20 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} d_{km} \quad (3.3)$$

em que f_{MHz} é a frequência de operação em MHz e d_{km} é a distância entre receptor e transmissor em Km.

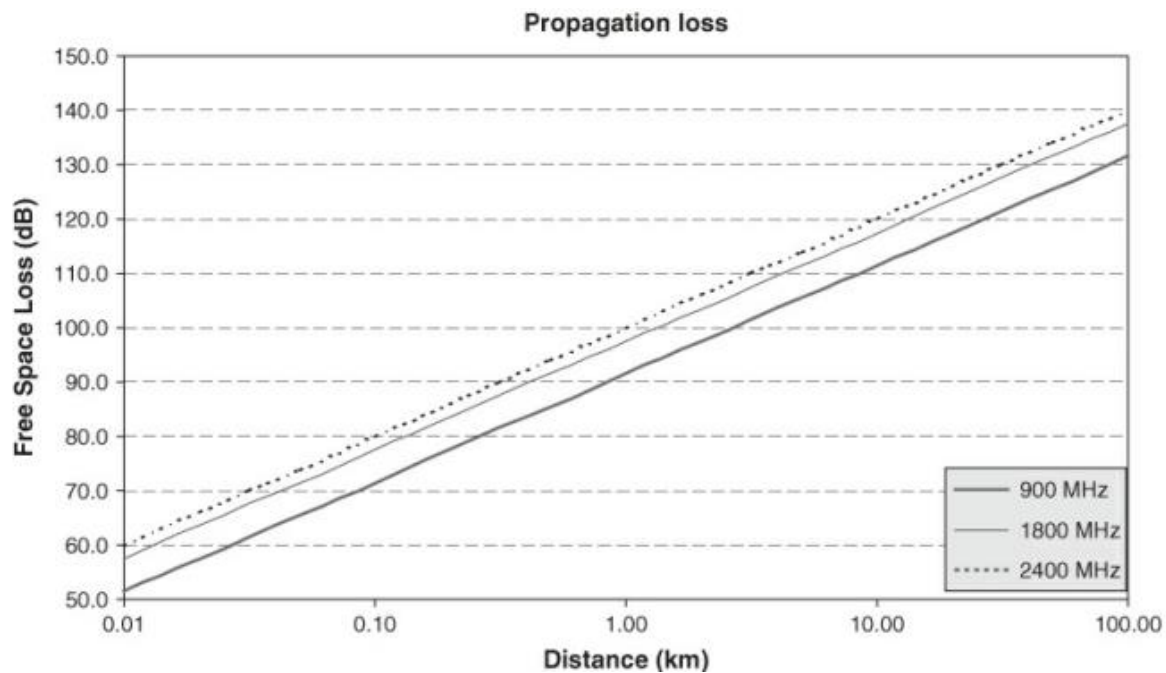


Figura 3.1 - Relação entre a distância e a perda no espaço livre [3].

Percebe-se que conforme a distância cresce, a perda também cresce em escala: aumentando a distância em dez vezes, a perda aumenta em 20 dB, aproximadamente. O mesmo ocorre com a frequência.

É importante frisar que, para sistemas mais complexos e reais, a adoção do modelo de perda por espaço livre pode não descrever o sistema com fidelidade. Para isso existem os modelos de propagação empíricos, onde são levados em consideração medidas reais de parâmetros do modelo, que podem sofrer adaptações, dependendo dos parâmetros coletados da região, altura das antenas e faixa de frequência. Isso faz com que a diferença entre o estudo teórico e a aplicação prática sejam minimizados [5]. Os modelos empíricos mais conhecidos serão vistos a partir das próximas sessões e o modelo escolhido para aplicação neste projeto está explicitado na sessão 3.4.2.

3.4.1 Modelo Okumura-Hata

É um método totalmente empírico que envolve a divisão da área de predição em três categorias: área aberta, urbana e suburbana. A área aberta pode ser descrita como um espaço completamente aberto, sem árvores altas ou prédios pelo caminho. A área urbana é uma cidade com grandes construções, casas e árvores robustas. Já a área suburbana é uma vila ou rodovias sem grandes congestionamentos, e algumas casas pelo caminho.

Esse modelo utiliza a área urbana como referência e aplica fatores de correção para se relacionar com outras classificações. A predição de perda por propagação de Okumura é feita utilizando as aproximações descritas nas Equações 3.4, 3.5 e 3.6 [5].

Área aberta:

$$L_{dB} = A + B \log R - D \quad (3.4)$$

Área urbana:

$$L_{DB} = A + B \log R - E \quad (3.5)$$

Área suburbana:

$$L_{DB} = A + B \log R - C \quad (3.6)$$

Onde

$$A = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_b \quad (3.7)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log h_b \quad (3.8)$$

$$C = 2(\log(\frac{f_c}{28}))^2 + 5.4 \quad (3.9)$$

$$D = 4.78(\log f_c)^2 - 18.33 \log f_c + 40.94 \quad (3.10)$$

$$E = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97, \text{ para cidades grandes e } f_c \geq 300 \text{ MHz} \quad (3.11)$$

$$E = 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1, \text{ para cidades grandes e } f_c < 300 \text{ MHz} \quad (3.12)$$

$$E = (1.11 \log f_c - 0.7)h_m - (1.56 \log f_c - 0.8), \text{ para cidades pequenas} \quad (3.13)$$

Como esse modelo é válido para $150\text{MHz} \leq f_c \leq 1500 \text{ MHz}$ e distância entre transmissor e receptor de 1 Km a 100 Km, sua explanação foi adicionada a este projeto pois é o modelo básico para o desenvolvimento de todos os outros modelos [18] e, para cidades pequenas, serviu como base para a construção do modelo utilizado aqui.

3.4.2 Modelo Cost 231-Hata

Após a maturação do modelo de Okumura-Hata e sua extensão para cobrir a banda de $1500 \text{ MHz} < f_c < 2000 \text{ MHz}$, foi criado o modelo Cost 231-Hata. Esse é o modelo usado para modelagem do presente projeto e sua expressão é dada pela Equação 3.14 [5]:

$$L_{dB} = F + B \log R - E + G \quad (3.14)$$

onde

$$F = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b \quad (3.15)$$

$G = 0 \text{ dB}$ para cidades médias e suburbanas e 3 dB para áreas metropolitanas.

Toda a parametrização utilizada será explicitada em sessões subsequentes deste capítulo.

3.5 Desvanecimento em Pequena Escala

O desvanecimento é um fenômeno que ajuda ainda mais a explicar as variações que o sinal recebido sofre enquanto o móvel está se deslocando dentro de uma área de cobertura. Ele ocorre quando o caminho entre a transmissão e a recepção está repleto de obstáculos que fazem com que o sinal seja refletido várias vezes, o que dissipa a energia do sinal e faz com que ele chegue de diferentes caminhos ao receptor.

O desvanecimento compreende também os efeitos de ruído que o sinal sofre, onde o mais simples caso prático é o canal com ruído aditivo branco gaussiano, ou *AWGN*, do inglês *Additive White Gaussian Noise*. Quando o sinal é transmitido por um canal desse tipo, ao chegar no demodulador, ele sofre com a adição de alguns ruídos e a multiplicação de perda de percurso, que é fixa [7].

As distribuições mais comuns que explicam os efeitos de desvanecimento, ou multipercurso, são: distribuição de Rice e a distribuição de Rayleigh.

- **Distribuição de Rice** – O sinal recebido modelado por essa distribuição é composto por um componente coerente de linha de visada, ou *LOS*, do inglês *Line-of-Sight*, que é basicamente a linha “imaginária” que une o transmissor e o receptor sem objetos no caminho e que, nesse caso, tem potência constante, e um componente variável de multipercurso [7].
- **Distribuição de Rayleigh** – Utilizada quando se pretende modelar um canal com componentes de desvanecimento em multipercurso para diferentes caminhos sem linha de visada [5].

3.6 Ferramenta de Simulação

O uso de ferramentas de simulação tem sua importância elevada para a correta e detalhada predição de qualquer rede atualmente. O objetivo na utilização de tais recursos computacionais é o de reduzir o trabalho do estudo teórico, aplicando todos os conceitos e simulando o que pode acontecer na prática. A precisão e praticidade com que os resultados são alcançados é um fator fundamental para que seja aplicada a modelagem no mundo real.

O *CelPlanner* é um desses recursos que traz soluções para projetos de sistemas sem fio. Ele permite a realização de toda a predição de cobertura da rede, suporta diversas tecnologias, entre elas o *LTE*, simula o tráfego na rede, possibilita a utilização de bases de dados topográficos, morfológicos e um arquivo de antenas extenso, com a possibilidade de criação de padrões de antenas.

Dentro do *CelPlanner*, deve-se configurar a rede da forma como convém ao projetista. Parâmetros como a localização das células, modelo de propagação e seus fatores, modulação da tecnologia, frequência central e modo de operação, fatores de antenas, tanto das estações base como dos equipamentos do usuário, como potência de transmissão e recepção, altura, ganhos, perdas, *azimuth* e *tilt*, entre vários outros [12]. As configurações realizadas para a predição da rede *LTE* 2.5 GHz banda 38 no Distrito Federal serão explicitadas a partir da próxima sessão.

3.6.1 Configurações utilizadas para o *LTE* 2.5 GHz

A primeira configuração a ser feita na ferramenta é a escolha da tecnologia a ser implementada no projeto que, nesse caso, é a tecnologia *LTE*. Na mesma tela, pode-se colocar detalhes sobre o projeto para auxiliar em sua apresentação, além de todas as configurações possíveis do programa. A Figura 3.2 mostra todas essas configurações.

Para que o sistema tenha toda a base de dados já descrita, é preciso indicar o caminho para os arquivos onde ficarão salvas as predições de cada célula (PCI) e as predições do sistema como um todo (PCC), além do caminho onde está a base de dados morfológicos, topográficos e dos arquivos que simulam as antenas que poderão ser utilizadas no projeto. Isso é feito na aba *Database Directories*, o que pode ser verificado na Figura 3.3.

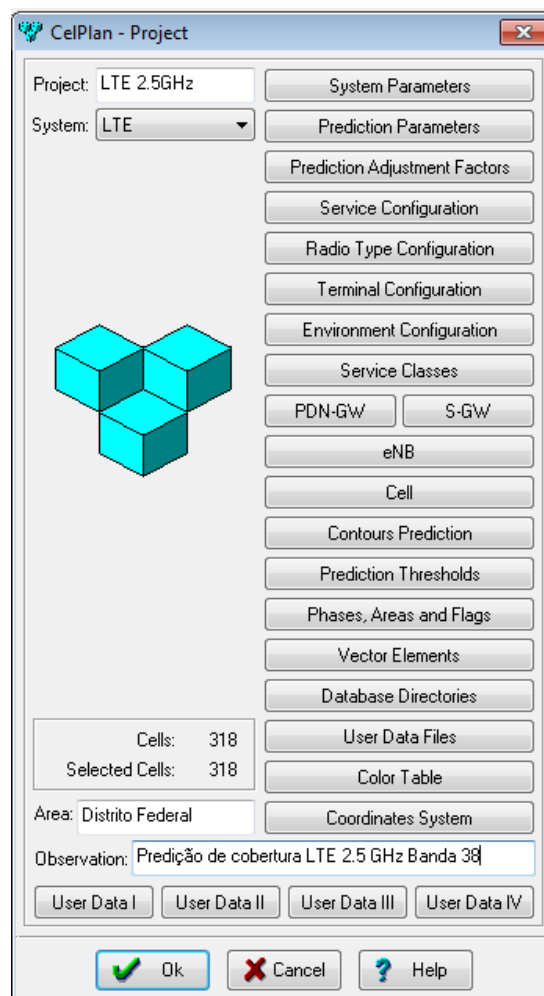


Figura 3.2 - Primeiras configurações do sistema.

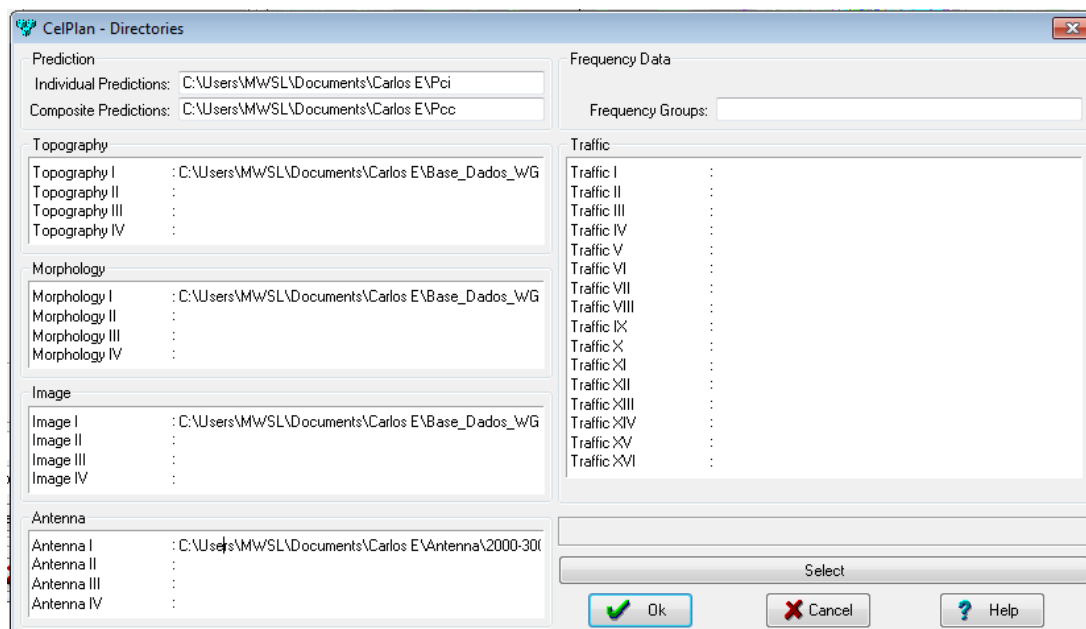


Figura 3.3 - Diretórios da base de dados da ferramenta.

O próximo passo são as configurações de rádio do sistema. Para este projeto, é necessário configurar dois tipos de rádio: a estação base e o terminal móvel. Eles compreendem configurações de largura de banda, modulação dos enlaces de descida e de subida e modo de duplexação. Os parâmetros escolhidos para as configurações de rádio da *eNodeB* foram:

- **Modelo:** *e-NodeB*;
- **Tipo de rádio:** *eNB*;
- **LTE Release:** 8/9;
- **Largura de Banda:** 20 MHz;
- **Modo de duplexação:** *TDD*;
- **Quadro TDD:** 2;
- **Subquadro especial:** 7;
- **Esquemas de modulação dos enlaces de descida e subida:** *QPSK*, *16QAM* e *64 QAM*;
- **Potência de transmissão máxima de saída:** 40 W.

Já os parâmetros da configuração de rádio do terminal móvel foram:

- **Modelo:** *CPE*;
- **Tipo de rádio:** *UE*;
- **LTE Release:** 8/9;
- **Largura de Banda:** 20 MHz;
- **Modo de duplexação:** *TDD*;
- **Quadro TDD:** 2;
- **Subquadro especial:** 7;
- **Esquemas de modulação dos enlaces de descida e subida:** *QPSK*, *16QAM* e *64 QAM*;
- **Potência de transmissão máxima de saída:** 0.2 W.

O esquema de duplexação escolhido se deve ao fato da SKY Brasil Serviços LTDA. terem autorização da *Anatel* para operar apenas em modo de Duplexação por Divisão de Tempo (TDD). Os quadros seguem padronização utilizada na rede. A configuração 2 do quadro TDD significa que em um quadro completo de transmissão, seis subquadros são dedicados para o enlace de descida, dois para o enlace de subida e outros dois são para subquadros especiais. Já a configuração 7 de subquadro especial significa que 21.952 janelas de tempo serão dedicadas para o enlace de descida e 4.384 serão dedicados para o enlace de subida [13].

Essas informações podem ser verificadas nas Figuras 3.4 e 3.5. Já todas as configurações para a *eNodeB*, a título de exemplificação, pode ser conferida na Figura 3.6.

Configuration	3GPP release	Subframe number										Number of subframes / frame		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	D [DL]	U [UL]	S [SSF]
0	8	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U	2	6	2
1	8	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D	4	4	2
2	8	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D	6	2	2
3	8	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D	6	3	1
4	8	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	7	2	1
5	8	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D	8	1	1
6	8	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	3	5	2

Figura 3.4 - Configuração do quadro TDD [13].

Configuration	3GPP release	DwPTS (Ts)	UpPTS (Ts)
0	8	6592	2192
1	8	19760	2192
2	8	21952	2192
3	8	24144	2192
4	8	26336	2192
5	8	6592	4384
6	8	19760	4384
7	8	21952	4384
8	8	24144	4384
9	11	13168	4384

Figura 3.5 - Configuração dos subquadros especiais do TDD [13].

Figura 3.6 - Configurações de rádio das eNodeBs.

A configuração do modelo de perda por propagação pode ser feita na janela de Parâmetros de Predição, ou *Prediction Parameters*. Para este projeto, como já foi dito anteriormente, foi escolhido o modelo Cost 231-Hata, com parâmetros modificados segundo

estudos realizados pela operadora e fornecidos para a realização deste projeto. Os parâmetros modificados que foram utilizados são: fator de difração, fator de frequência, altura de referência da célula, fator de interceptação de altura de célula e o fator de inclinação de altura de antena. Os valores de cada parâmetro podem ser verificados na Figura 3.7.

Além disso, foi modificado o Fator de *Clutter* de cada tipo de terreno para valores mais reais, segundo os estudos da operadora. Esse fator corresponde à perda por penetração de cada terreno.

Type	Terrain Type Description	Intercept (dB)	Slope (dB/Dec)	Clutter Factor (dB)
☒ 00	Water	69.55	44.9	0
☒ 01	Low vegetation	69.55	44.9	-0.7
☒ 02	Medium vegetation	69.55	44.9	0
☒ 03	Dense vegetation	69.55	44.9	0
☒ 04	Suburban Area	69.55	44.9	0.5
☒ 05	Urban Area	69.55	44.9	1.5
☒ 06	Dense Urban Area	69.55	44.9	1.5
☒ 07	Buildings	69.55	44.9	1.5
☐ 08		0	0	0
☐ 09		0	0	0
☐ 10		0	0	0
☐ 11		0	0	0
☐ 12		0	0	0
☐ 13		0	0	0
☐ 14		0	0	0
☐ 15		0	0	0
☐ 16		0	0	0
☐ 17		0	0	0
☐ 18		0	0	0
☐ 19		0	0	0
☐ 20		0	0	0
☐ 21		0	0	0
☐ 22		0	0	0
☐ 23		0	0	0
☐ 24		0	0	0
☐ 25		0	0	0
☐ 26		0	0	0
☐ 27		0	0	0
☐ 28		0	0	0
☐ 29		0	0	0
☐ 30		0	0	0
☐ 31		0	0	0
☒ Nd	Type not defined	69.55	44.9	28.41

Figura 3.7 - Configuração do modelo Cost 231-Hata.

O *CelPlanner* dispõe de configuração de serviço disponibilizado pela SKY Brasil Serviços LTDA. para o usuário. Os campos foram preenchidos de acordo com dados fornecidos pela operadora. Isso é importante para o controle da qualidade de serviço (QoS) e de latência requerida. Essa configuração é ilustrada na Figura 3.8.

Quality of Service		Downstream	Upstream
Maximum Sustained Traffic Rate (kbps):		4000	512
Minimum Tolerable Traffic Rate (kbps):		4000	512
Target Latency (s):		0.01	0.01
Data Overhead Factor:		0	0
Required Bit Error Rate - BER:		10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

Summary		Downstream	Upstream
Active Customers (Service Load):		0.8	0.2
Mean Packet Size (bytes):		600	100
Mean Rate/Customers (kbps):		3200	102.4
Maximum Over-subscription Ratio:		1:1.25	1:5
Suggested Over-subscription Ratio:		1:1.116071	1:4.324324
Over-subscription Ratio:		1:1.116071	1:4.324324
Expected Mean Latency (s):		0.01	0.01
Hour Tonnage (Mbytes):		1373.291016	43.945312

Figura 3.8 - Configuração do serviço oferecido.

O passo seguinte é a configuração do tipo de ambiente em que a rede estará inserida. Para tal, considerou-se o sistema sem mobilidade, já que o produto oferecido ficará fixo na casa dos usuários. A atenuação média do corpo humano de 3 dB e a atenuação por penetração de 8 dB. A Figura 3.9 ilustra a configuração do ambiente para esse cenário.

Em seguida, as propriedades do equipamento do usuário são inseridas em dois cenários, separados a seguir. A Figura 3.10 exemplifica essas configurações.

- **CPE Indoor** – São os equipamentos ofertados para uso dentro das residências. Têm potência de transmissão de 23 dBm, ou 0.2 W, ganhos relacionados a transmissão e recepção de 7 dB, perdas relacionadas a transmissão e recepção de 3 dB e ganho nominal de antena de 7 dBd. A altura na qual a antena está é muito variável, mas em uma média, ela estará a 0.5 m do solo;
- **CPE Outdoor** – São equipamentos especiais utilizados fora das residências. Têm a mesma potência de transmissão e perdas da *CPE Indoor*. Já os ganhos são de 12 dB para a transmissão e para a recepção, e ganho nominal de antena de 12 dBd. Da mesma forma, a altura da antena pode variar em cada caso, mas estará em uma média de 5 m do solo.

Feita a configuração de todas essas propriedades, é necessário o cadastro das estações base no *CelPlanner*. Todas as estações foram geograficamente colocadas conforme o banco de dados oferecido pela operadora para a realização desse projeto. Ao todo, são 106 ERBs por todo o Distrito Federal, cada uma com três células dispostas em azimutes diferentes.

Os parâmetros que devem ser preenchidos nessa configuração são:

- Identificação da célula;
- Posicionamento geográfico da célula, com latitude e longitude;
- Atributos da antena, como azimute, *tilt*, altura e polarização;

Figura 3.9 - Configurações do ambiente.

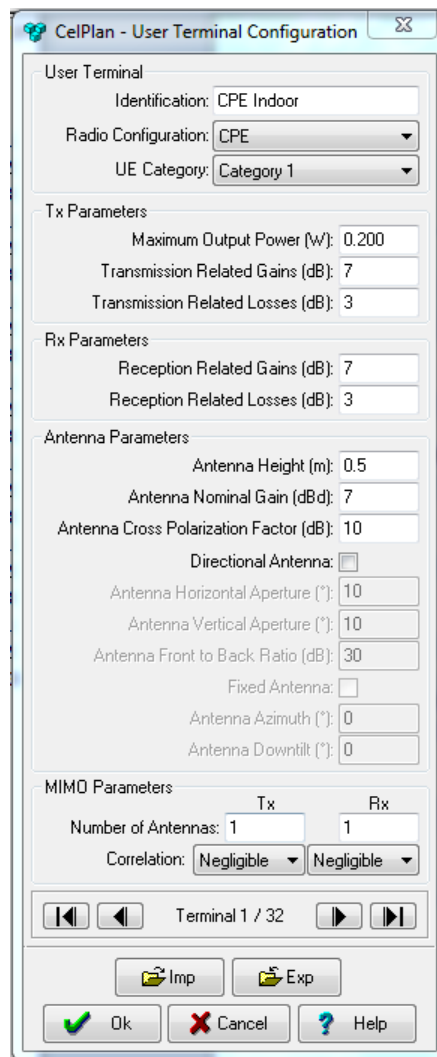


Figura 3.10 - Configurações do equipamento do usuário.

- Frequência central de operação;
- Modelo de perda por propagação a ser utilizado, bem como seus parâmetros, ajustados na janela de parâmetros de predição.

Para exemplificação, a configuração da célula DFGAM1-1 pode ser verificada na Figura 3.11. A Tabela I.1 do Anexo I deste projeto, ilustra todas as células que compõem o sistema criado, seus respectivos azimutes e *tilts*. As regiões administrativas do Distrito Federal que têm cobertura atualmente são Águas Claras, Ceilândia, Gama, Guará, Lago Norte, Lago Sul, Paranoá, Park Way, Recanto das Emas, Samambaia, Sobradinho, Sudoeste, Taguatinga e Vicente Pires, além, é claro, do Plano Piloto em si.

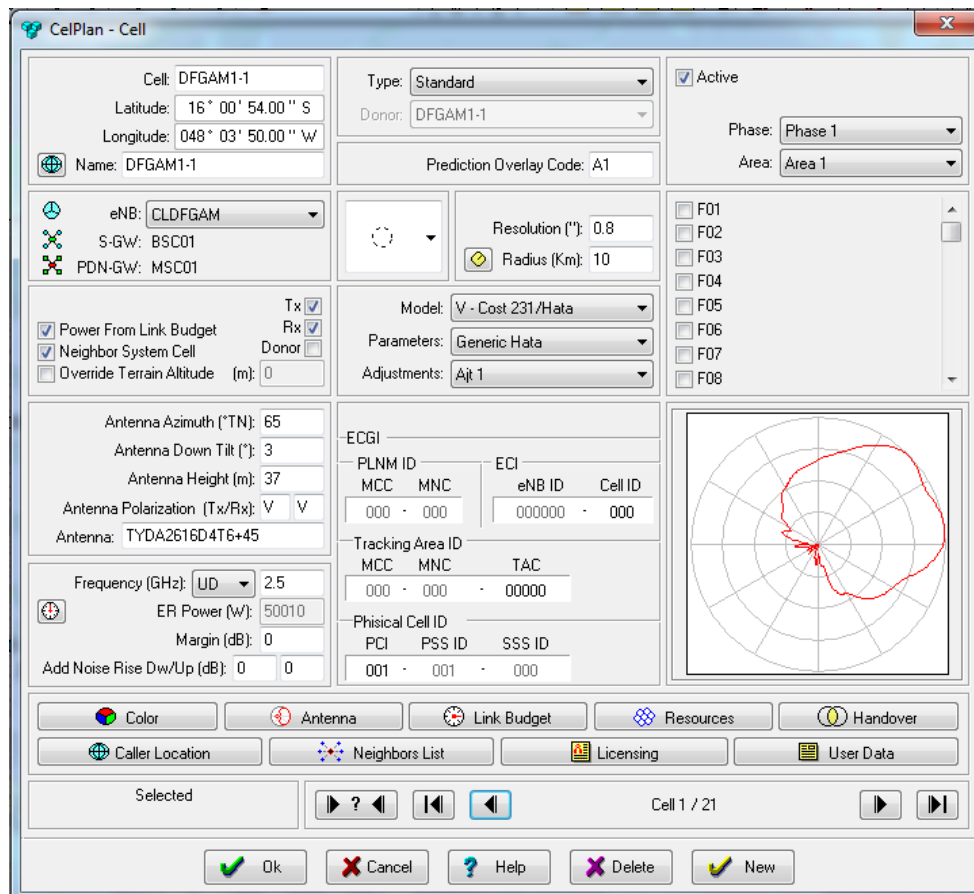


Figura 3.11 - Configuração de uma das células do sistema.

A escolha da antena é feita segundo o modelo de antena utilizado pela SKY Brasil Serviços LTDA. A antena é da fabricante Tongyu Communication Inc. e o modelo correspondente é o TYDA-2616D4T6, homologado pela Anatel desde 2011 [20]. A antena tem diagrama de irradiação mostrada na Figura 3.12. O diagrama de irradiação é a função matemática das propriedades de radiação de uma antena. Ela é composta por lóbulos, que é a parte do diagrama delimitada por baixa intensidade de radiação. Existe um lóbulo principal (azul) que determina o raio de radiação e dois lóbulos laterais (verde e vermelho) no diagrama da Figura 3.12

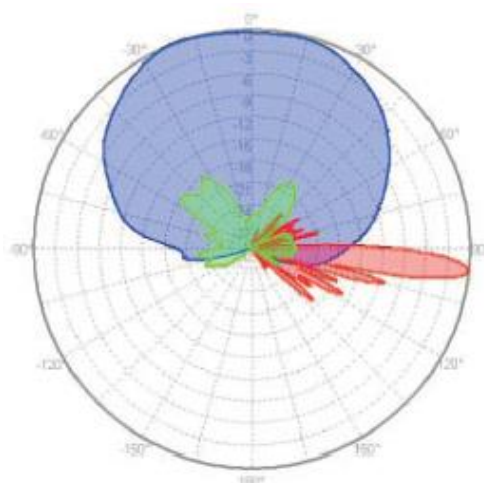


Figura 3.12 - Diagrama de irradiação da antena Tongyu TYDA-2616D4T6 [21].

Já a janela de seleção de antena do *CelPlanner* é ilustrada na Figura 3.13. É importante frisar que todas as células utilizam a mesma antena, portanto, essa configuração é a mesma para todas.

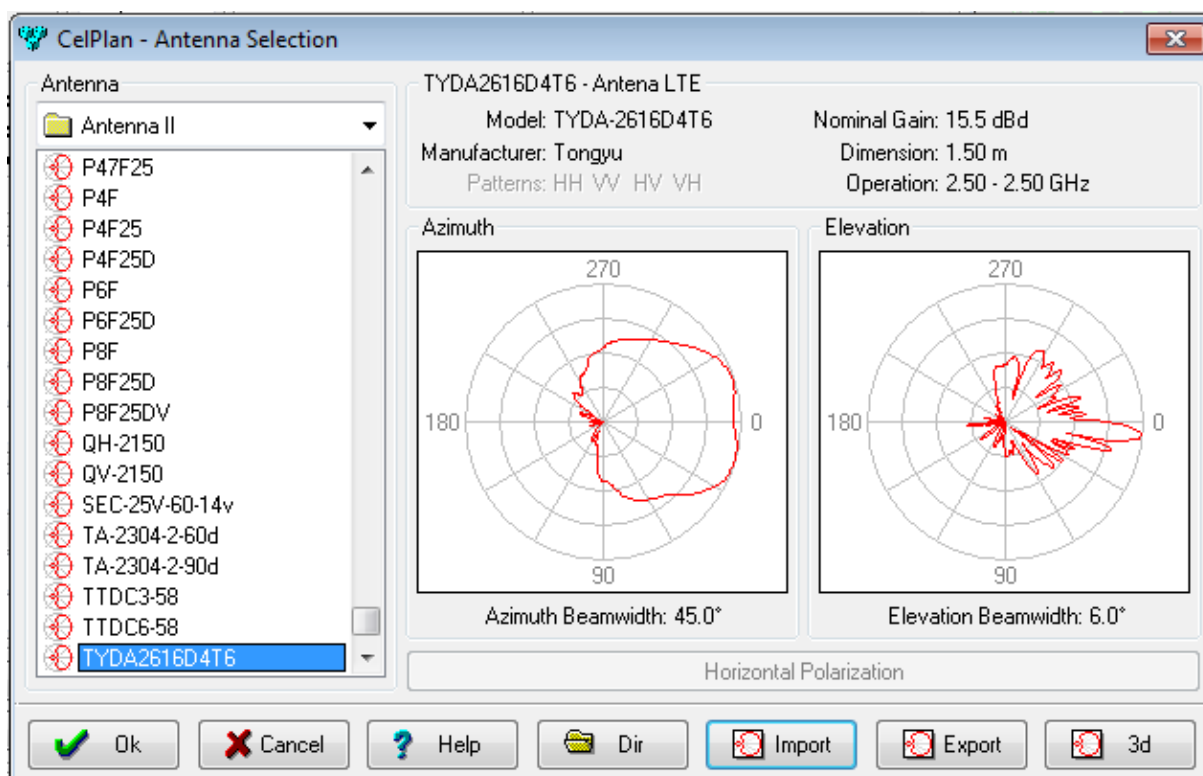


Figura 3.13 - Janela de seleção de antenas e diagrama de irradiação.

Por fim, a última etapa de configuração é o balanceamento de enlace de cada célula para a obtenção da área de cobertura. Mais uma vez, o todas as células compartilham da mesma parametrização de balanceamento de enlace, portanto a Figura 3.14 exemplifica as configurações feitas para a célula DFGAM1-1 e deve ser considerada para todas as outras células.

Todos os dados constantes da Figura 3.14 foram fornecidos pela empresa SKY Brasil Serviços LTDA. Os campos que devem ser preenchidos para o balanceamento de enlace são:

- Potência de transmissão;
- Ganhos e perdas relacionadas à transmissão;
- Comprimento e perdas por cabos;
- Número de conectores e suas respectivas perdas. Neste caso, o número de conectores é considerado desprezível;
- Potência de recepção;
- Ganho de antena;
- Ganhos e perdas relacionadas à recepção.

CelPlan - Cell Link Budget

Tx Parameters

- Amplifier Output Power (W): 40.00
- ☒ Reference Signal Power (dBm): 46
- Transmission Gains (dB): 17
- Transmission Losses (dB): 3
- Cable Loss (dB/100 m): 3
- Cable Length (m): 1
- Connection Loss (dB): 0
- Number of Connections: 0
- Base Antenna Tx Gain (dBd): 17

Rx Parameters

- Subscriber Output Power (W): 40.00
- Base Antenna Rx Gain (dBd): 17
- Reception Gains (dB): 17
- Reception Losses (dB): 3
- Connection Loss (dB): 0
- Number of Connections: 0
- Cable Loss (dB/100 m): 3
- Cable Length (m): 1

MIMO Parameters

- Number of Tx Antennas: 1
- Correlation: Negligible
- Number of Rx Antennas: 1
- Correlation: Negligible

Beamforming

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

Effective Radiated Power: 50010 W (77.0 dBm) dBm

Service Class:

● IDU

Power Balance

- Power Balance Factor (dB): 23.0
- Suggested Sector Output Power (W): 0.200
- Suggested Subscriber Output Power (W): 0.200

✓ Ok ✗ Cancel ? Help

Figura 3.14 - Balanceamento de enlace de uma célula.

3.7 Síntese do Capítulo

Este capítulo fez a apresentação de conceitos de perda por propagação, fundamentais para o correto entendimento da modelagem do sistema, além da fundamentação de toda a parametrização necessária para a predição do sistema *LTE* da SKY Brasil Serviços LTDA. no *CelPlanner*. Os resultados da configuração mostrada nesse capítulo serão expostos no capítulo seguinte, onde serão analisados, debatidos e uma solução para a otimização de uma região será apresentada.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta todos os resultados obtidos com a predição do sistema LTE feita e explicada no capítulo anterior. Tais resultados serão debatidos e será apresentada uma solução de otimização para uma determinada região do Distrito Federal.

4.1 Predição de cobertura do Distrito Federal

Toda a configuração realizada no capítulo passado permitiu que se chegasse a predição de cobertura real da tecnologia LTE 2.5 GHz banda 38 no Distrito Federal. Todas as células foram divididas por região administrativa para melhor organização e todas essas divisões estão listadas na Tabela 1 do Anexo I. Uma visão geral do mapa morfológico da região com todas as células devidamente localizadas é explicitada na Figura 4.1.

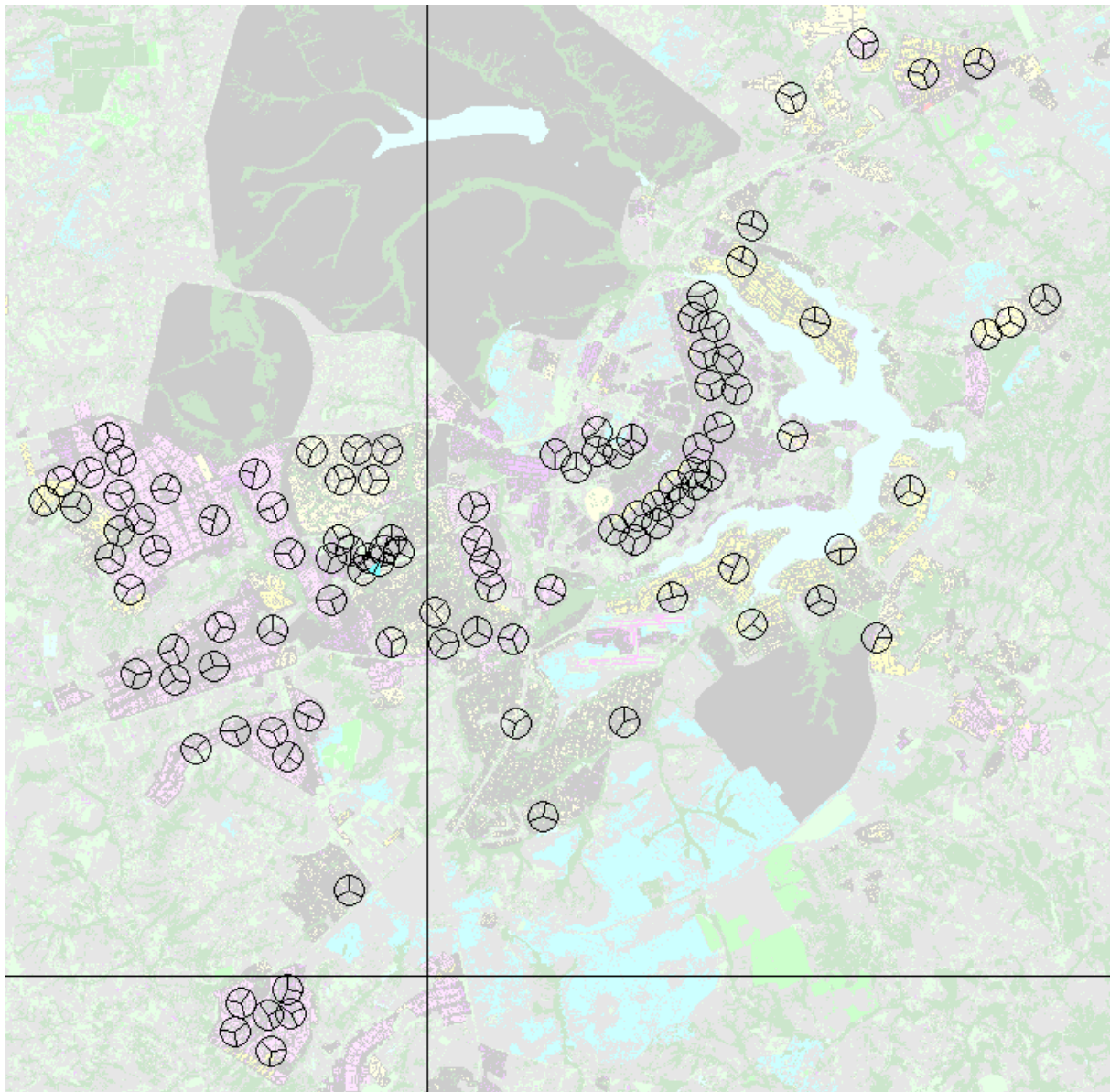


Figura 4.1 - Mapa morfológico do Distrito Federal com o posicionamento de todas as *eNodeBs*.

Com o objetivo de cobrir o Distrito Federal como um todo, nota-se que a disposição das *eNodeBs* está de acordo com o que é proposto. Depois de realizada a predição de cobertura de toda a região para o enlace de descida, o resultado é ilustrado na Figura 4.2.

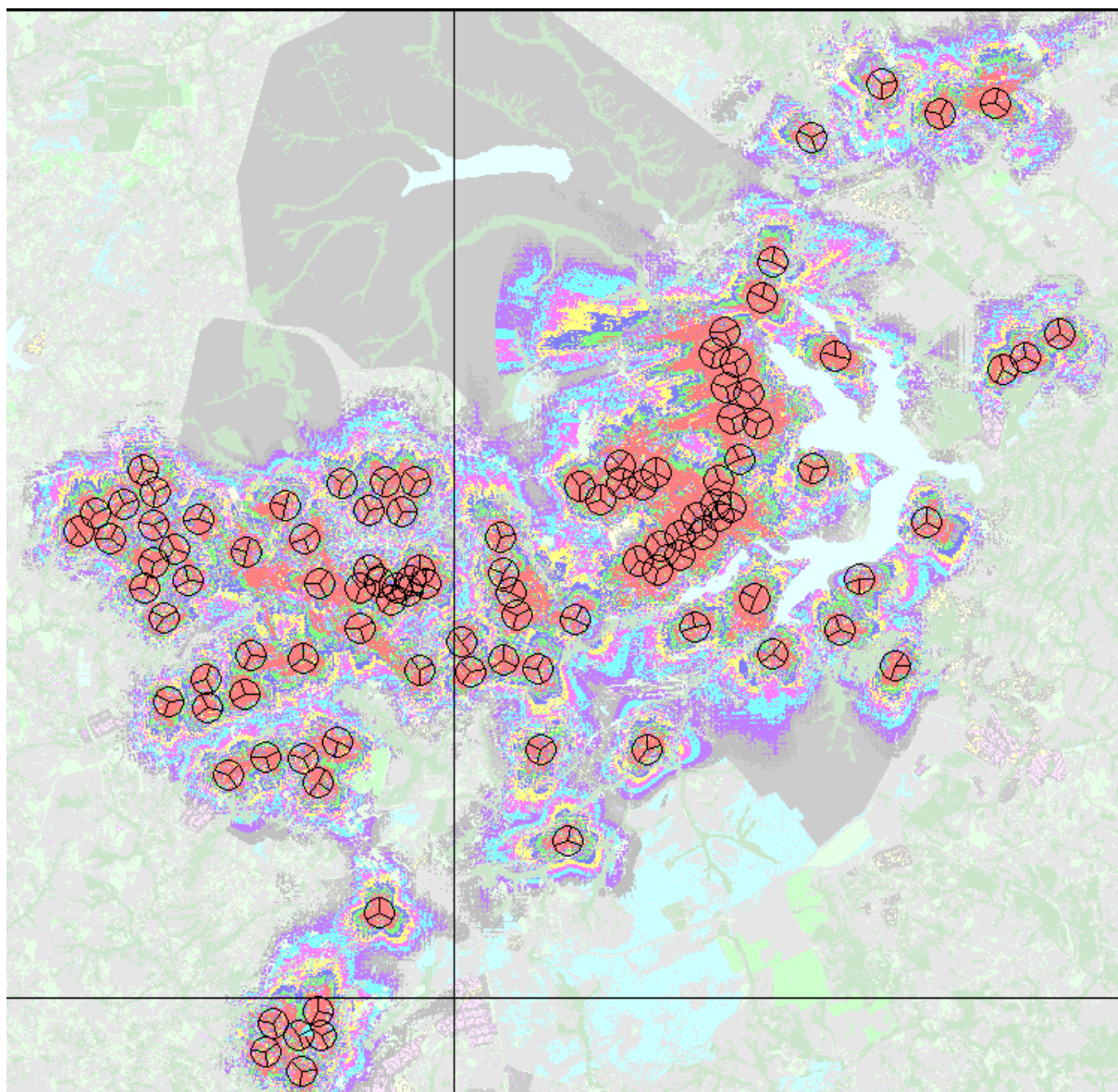


Figura 4.2 - Predição de cobertura da rede LTE 2.5 GHz banda 38 do Distrito Federal.

A legenda com o esquema de cores e respectivos níveis de potência de sinal (em dBm) está apresentada na Figura 4.3. Nota-se que a cobertura, considerando toda a região, tem valores de RSRP altos, com base em padrões internacionais, na maior parte da região apresentada, porque está focada em oferecer maior intensidade de sinal dentro das regiões administrativas. Comercialmente, esse enfoque é interessante, pois tem o potencial de englobar maior número de possíveis consumidores, oferecendo um serviço de maior qualidade.

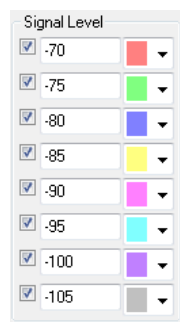


Figura 4.3 - Níveis de intensidade de sinal.

Os resultados detalhados de cobertura para o enlace de descida de cada região separada se encontram nas Figuras II-1 a II-14 do Anexo II deste documento. Foi através da análise destes resultados e levando em consideração as questões comerciais, o estudo do perfil socioeconômico dos usuários da rede feito pela operadora e questões estratégicas relacionadas a expansão da rede, a região administrativa escolhida para a realização da otimização foi o Gama.

O estudo feito pela SKY Brasil Serviços LTDA. é de caráter sigiloso e não pôde ser revelado no presente projeto, mas o critério de escolha teve como base o fato de que a região em análise tem impacto considerável na rede e tem uma carga de mais de 1000 usuários atualmente.

4.2 Processo de Otimização e Análise

O processo de otimização pode ser dividido em dois momentos diferentes. O primeiro momento compreende a análise individual das células da rede, explicada na última sessão. Esse passo é realizado, também, a cada nova eNodeB que é acrescentada na rede e seu objetivo é assegurar que cada célula está operando com seus parâmetros ótimos. O segundo momento é a otimização em radiofrequência e se inicia depois que todas as células estão devidamente verificadas. Seu objetivo é otimizar a cobertura de sinal já existente.

Um parâmetro essencial para concluir que uma determinada célula necessita de otimização é o Indicador-Chave de Performance, do inglês *Key Performance Indicator (KPI)*, que é o indicador que mede o desempenho do equipamento. Caso os KPIs de RF estiver de acordo com o que foi requerido, a otimização foi bem-sucedida.

Existem ainda dois tipos de otimização que podem ser realizadas no contexto da rede *LTE*. O primeiro é a otimização lógica, na qual é realizada a alteração de parâmetros de determinadas eNodeBs, como potência e taxa de *handover*, por exemplo. A segunda é a otimização física, que envolve a mudança de azimuth e *tilt* de determinadas células para que cubram uma área maior e melhorem as áreas já cobertas.

A otimização lógica envolve a compra de novos equipamentos que cumpram os requerimentos desejados para que a melhoria seja efetuada, o que não é o foco da estratégia comercial exposta. Portanto, a escolhida para ser realizada nesse projeto foi a otimização física, analisando as potenciais mudanças em azimuth e *tilt* que irão fazer com que a rede tenha um melhor desempenho após a otimização.

É importante frisar que existem dois tipos de *tilt* relacionados a uma eNodeB: o *tilt* elétrico (*EL*, do inglês *Electrical Tilt*), que é intrínseco ao equipamento e não pode ser alterado e o *tilt* mecânico (*MT*, do inglês *Mechanical Tilt*), que é a inclinação vertical que pode ser alterada manualmente [10]. Existem também restrições impostas pela SKY Brasil Serviços LTDA. para os valores que podem ser alterados: o azimuth pode ser alterado em até

$\pm 30^\circ$ do valor atual, em escalas de 10° em 10° , e o *tilt* mecânico pode ser alterado em até ± 2 unidades do valor atual, em escalas de 1 em 1 ponto.

A Figura 4.4 ilustra a situação atual da cobertura no Gama para o enlace de descida. É perceptível a existência de alguns locais com baixa intensidade de sinal e outros com espaços sem cobertura.

Para uma análise mais detalhada, a região será dividida e a localidade da eNodeB DFGAM7 será analisada separadamente. A Figura 4.5 ilustra a cobertura atual das células DFGAM1 a DFGAM6. A análise identificou que os locais mais propícios para a otimização são as que estão destacadas em cor preta. São locais onde a cobertura se apresenta de forma mais precária. Já a Figura 4.7 ilustra a cobertura da célula DFGAM7 e o local mais propício para a otimização da região também está destacada em cor preta na figura.

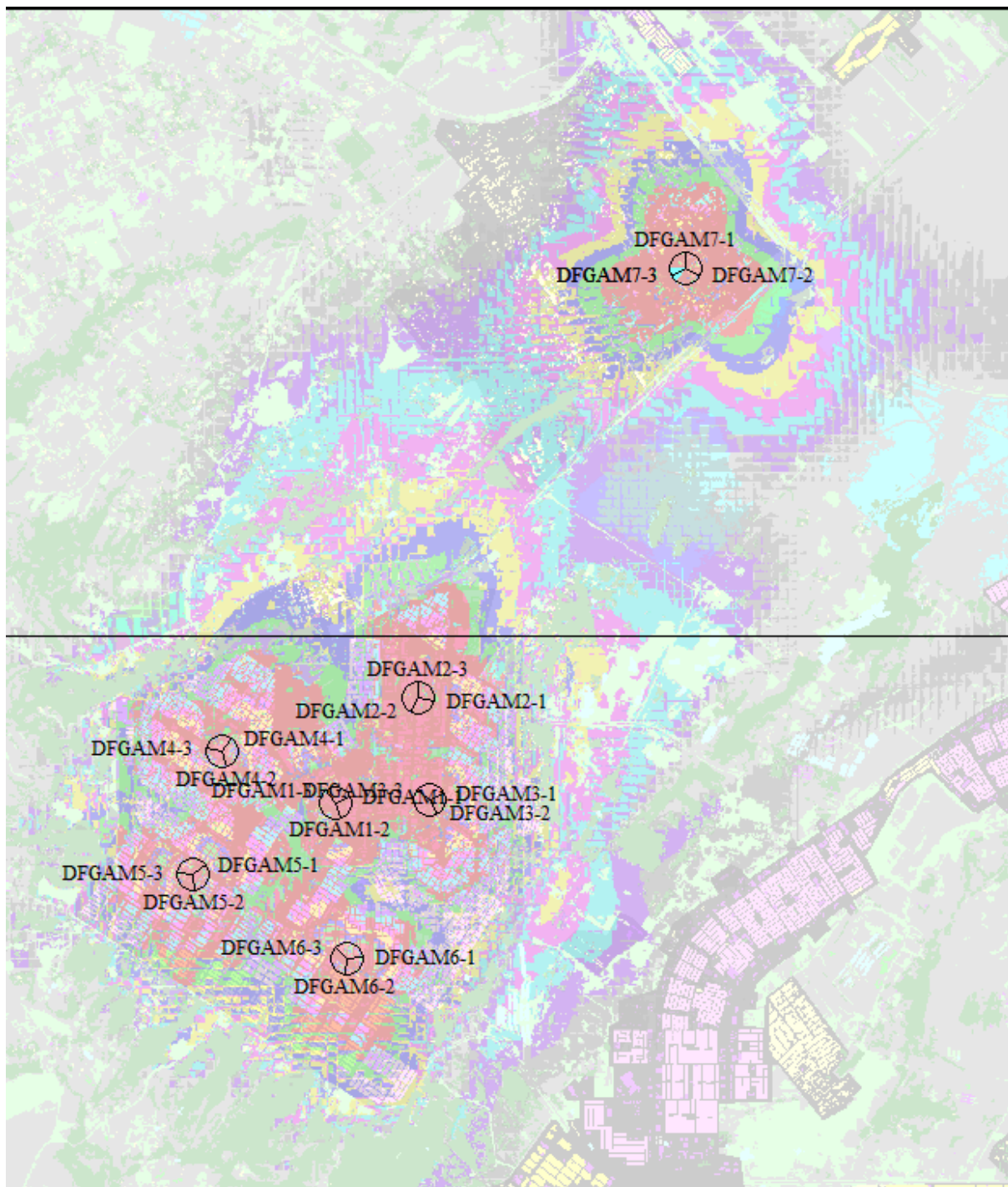


Figura 4.4 - Predição de cobertura atual do Gama.

4.3 Proposta de Otimização

Os parâmetros a serem alterados para a otimização física deste projeto foram analisados individualmente com o auxílio do *CelPlanner*. Cada eNodeB se comporta de uma maneira diferente para cada alteração de azimuth e *tilt* que é feito, portanto esse estudo se fez necessário para depois ser realizada a análise do comportamento de todas as eNodeBs funcionando conjuntamente.

Ao final dessa análise e com o auxílio das conclusões tiradas na sessão anterior, foi elaborada a proposta de otimização ilustrada na Tabela 4.1. Ela apresenta os valores de azimuth e *tilt* atuais e as suas versões otimizadas para cada célula de cada eNodeB.

Tabela 4.1 - Proposta de otimização para a região do Gama

Célula	Azimuth atual	<i>Tilt</i> mecânico atual	Azimuth otimizado	<i>Tilt</i> mecânico otimizado
DFGAM1-1	65°	3	65°	1
DFGAM1-2	160°	2	160°	0
DFGAM1-3	320°	0	320°	0
DFGAM2-1	100°	-4	100°	-2
DFGAM2-2	210°	3	210°	1
DFGAM2-3	360°	-4	360°	-4
DFGAM3-1	65°	2	65°	0
DFGAM3-2	150°	-2	180°	-4
DFGAM3-3	310°	3	310°	1
DFGAM4-1	40°	-5	30°	-3
DFGAM4-2	165°	3	185°	1
DFGAM4-3	280°	-2	290°	-2
DFGAM5-1	55°	-2	55°	-4
DFGAM5-2	175°	-4	155°	-2
DFGAM5-3	275°	0	275°	0
DFGAM6-1	85°	1	65°	-1
DFGAM6-2	185°	-3	185°	-3
DFGAM6-3	315°	-2	315°	-4
DFGAM7-1	0°	0	330°	-2
DFGAM7-2	120°	0	90°	-2
DFGAM7-3	240°	0	240°	-2

Apresentada a proposta, sua aplicação teve como resultado a transformação de áreas que não tinham cobertura para áreas com o mínimo de -90 dBm de potência, além de áreas onde o sinal chegava atenuado (onde se chegavam sinais de no máximo -85 dBm de potência) em áreas com intensidade de sinal superiores a -75 dBm.

O caso da região onde se encontra a célula DFGAM7 teve, inclusive, resultados melhores se considerarmos a área de cobertura. Uma das áreas de enfoque ilustradas na Figura

4.5, que não tinha nenhuma cobertura, agora é coberta por intensidade de sinal de, pelo menos, -95 dBm. Esses resultados são comprovados pelas Figuras 4.6 e 4.8.

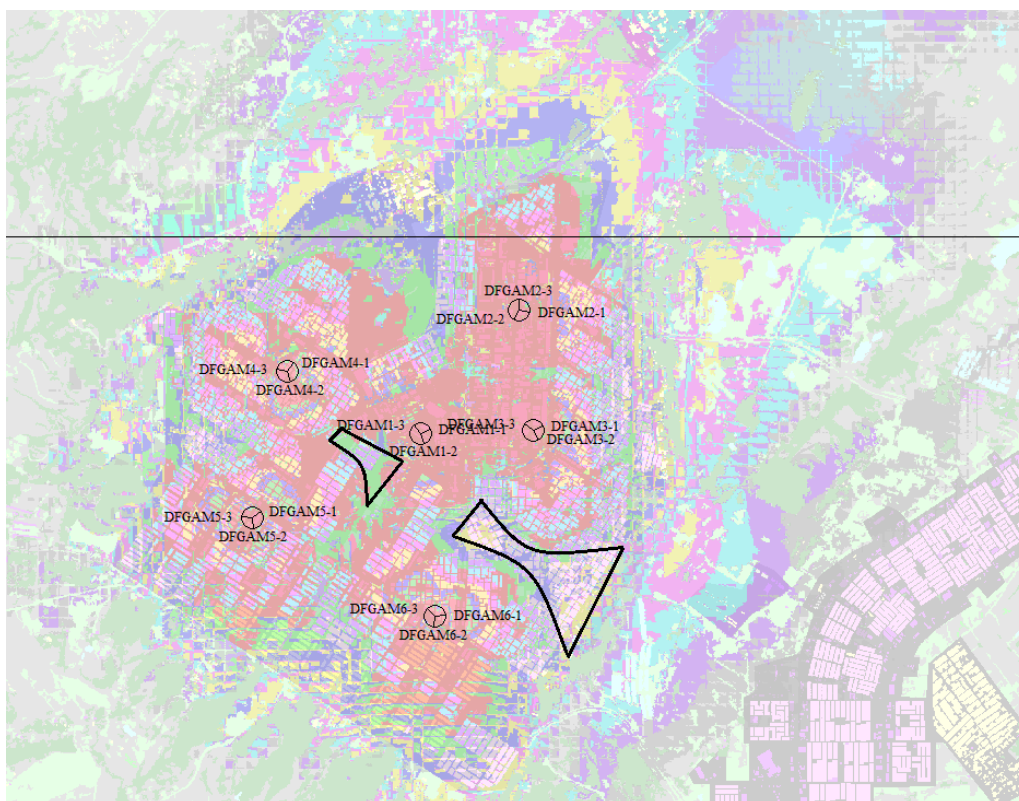


Figura 4.5 - Área de cobertura das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6.

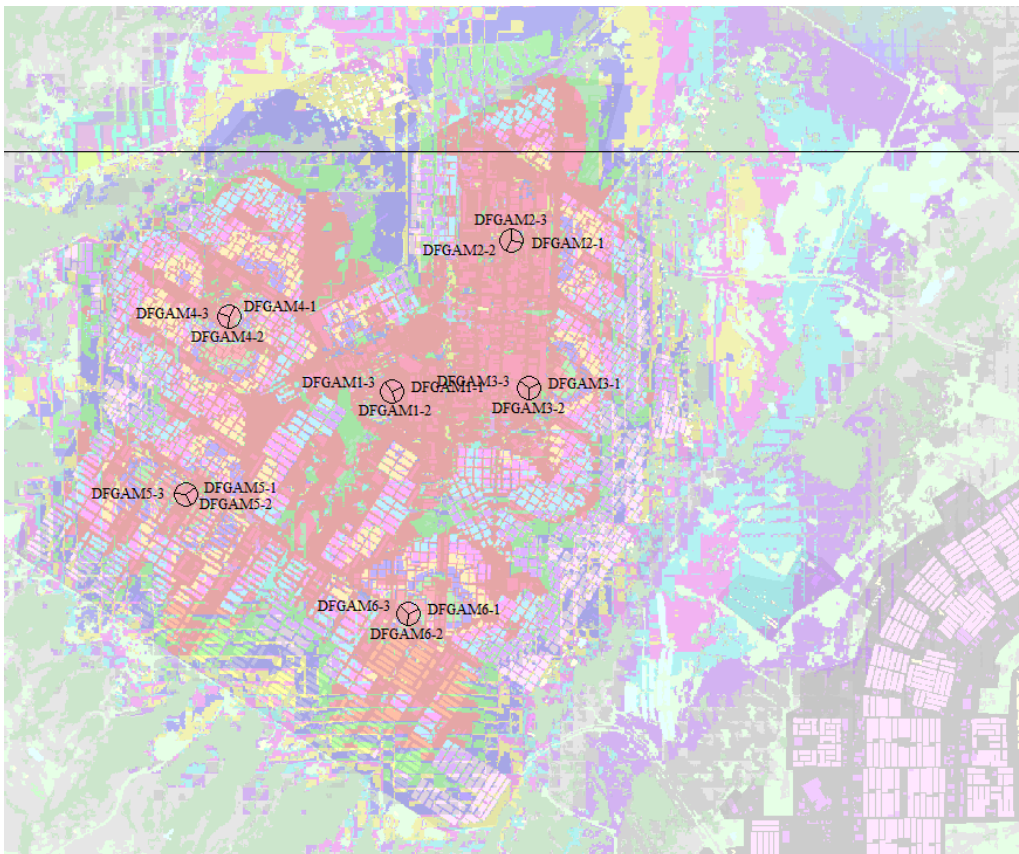


Figura 4.6 - Área de cobertura das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6 após a otimização.

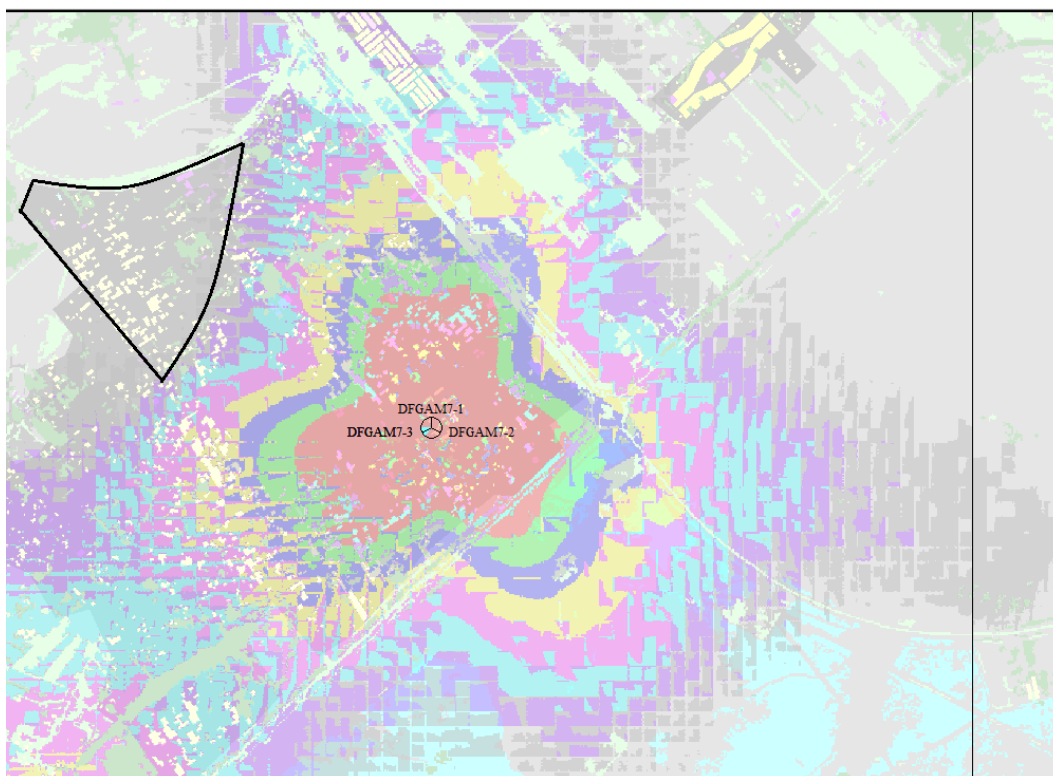


Figura 4.7- Área de cobertura da eNodeB DFGAM7.

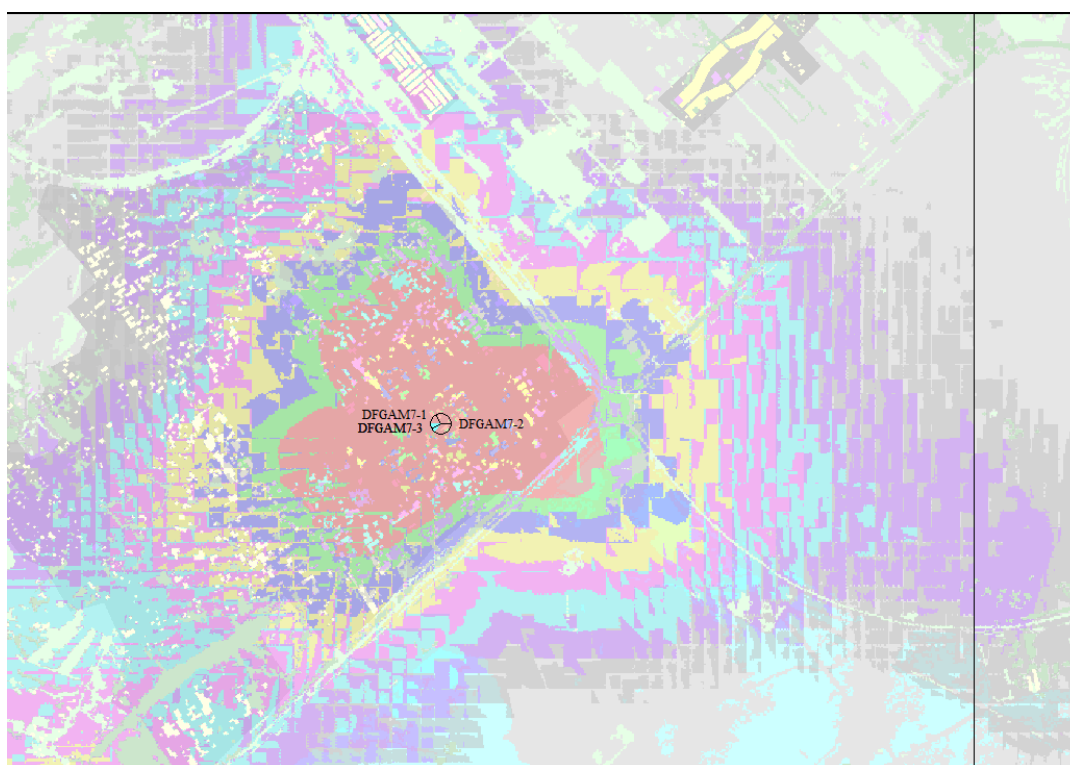


Figura 4.8 - Área de cobertura da eNodeB DFGAM7 após a otimização.

Outro indicativo de que a otimização foi bem-sucedida tem relação com outra funcionalidade do *CelPlanner*. Ele apresenta resultados percentuais da relação da intensidade de sinal com a região coberta por tal sinal. Tomando-se o cuidado de realizar a predição e a otimização sempre na mesma região, os resultados mostram, para a região das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6, que o maior nível de intensidade de sinal, onde se recebem potências maiores do que -70 dBm, tinha 8% de cobertura antes da otimização e, após a realização da

mesma, obteve 11% de cobertura. Outros níveis também aumentaram e, para efeito de comparação, as Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 ilustram as porcentagens de todos os níveis nos dois casos.

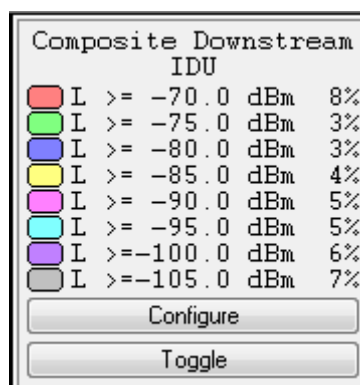


Figura 4.9 - Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal antes da otimização na região das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6.

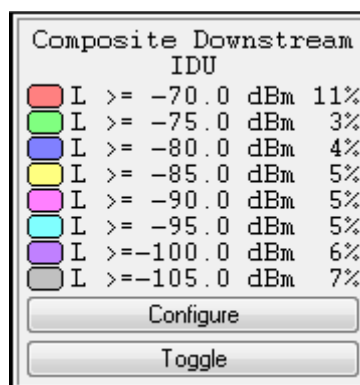


Figura 4.10 - Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal após a otimização na região das eNodeBs DFGAM1 a DFGAM6.

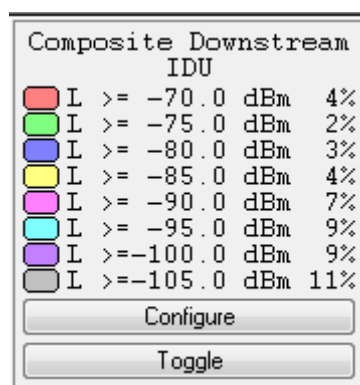


Figura 4.11 - Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal antes da otimização na região da eNodeB DFGAM7.

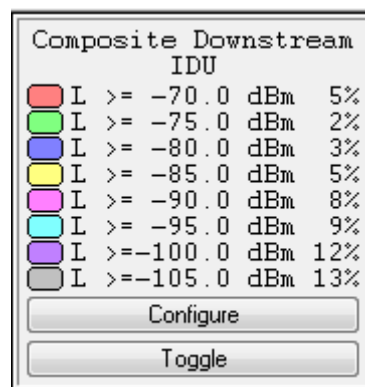


Figura 4.12 - Relação percentual dos níveis de intensidade de sinal após a otimização na região da eNodeB DFGAM7.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A base do presente projeto foi a rede *LTE* 2.5GHz banda 38 no Distrito Federal, delegada pela Anatel à SKY Brasil Serviços LTDA. em 2009, na qual a predição de cobertura realizada foi feita com anuência da empresa supracitada. A primeira parte do trabalho foi a configuração de todos os parâmetros pertinentes à rede em geral. Com a configuração concluída, a segunda parte englobou a realização da predição de cobertura da rede *LTE* com enfoque no enlace de descida com o auxílio da ferramenta computacional *CelPlanner* e posterior análise das possíveis regiões que necessitavam de melhoria. A escolha da Região Administrativa do Gama teve como justificativa, critérios técnicos, questões comerciais e estratégicas previamente alinhados com os interesses da empresa. A última parte do trabalho foi a elaboração de uma proposta de otimização para a rede apresentada e posterior aplicação dessa proposta para o cenário escolhido. A proposta envolveu a otimização física, baseada em alterações dos parâmetros de azimute e *tilt* mecânico das células.

O resultado da otimização da rede mostrou que as alterações realizadas surtiram o efeito desejado na rede, já que os locais que não dispunham de cobertura de sinal algum passaram a ter intensidade de sinal satisfatória para que tenham acesso à rede. Além disso, locais que contavam com cobertura de sinal passaram a ter uma melhor intensidade de sinal. Isso implica em melhores taxas de tráfego para a rede, além de, comercialmente falando, ter a possibilidade de conquistar novos usuários para o serviço. A rede de quarta geração tem muito a se desenvolver e deve receber ainda mais investimentos para que atinja a maturação.

Por alcançar resultados positivos com o projeto, como trabalho futuro, pretende-se estender a estratégia adotada para o Gama, para outras regiões afim de estruturar com melhor cobertura todo o Distrito Federal, além da possibilidade de empregar outra estratégia de otimização, conforme análise caso a caso.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKÖLD, J. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, 2011.
- [2] GOSH, A., ZHANG, J., ANDREWS, J. G., MUHAMED, R. Fundamentals of LTE. Prentice Hall, 2011.
- [3] KOROWAJCZUK, L. LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis. John Wiley & Sons, Ltd. 2011.
- [4] RAPPAPORT, T. S. Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas. 2 ed. Pearson Prentice Hall, 2008.
- [5] SAUNDERS, S. R., ARAGÓN-ZAVALA, A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2 ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2007.
- [6] SHARAWI, S. M. Evolved Network Planning and Optimization of UMTS and LTE. CRC Press. 2011.
- [7] STALLINGS, W. Wireless Communications and Networks. 2ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [8] SANTOS, D. dos. Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [9] ANATEL. Edital de Licitação: Radiofrequências na Subfaixa 2500 MHz a 2690 MHz e/ou na subfaixa de 451 MHz a 458 MHz e de 461 MHz a 468 MHz. 2012. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=287817&assuntoPublicacao=null&caminhoRel=null&filtro=1&documentoPath=287817.pdf>>. Acesso em 28 mai. 2016.
- [10] MEYER, L. J., Electrical and Mechanical Downtilt and their Effects on Horizontal Pattern Performance. White Paper: Andrew – A CommScope Company. 2010. Disponível em: <https://www.commscope.com/docs/electrical-mechanical_downtilt_effect_on_pattern_performance_wp-103755.pdf> Acesso em: 28 mai. 2016.
- [11] DAHLMAN, E., FURUSKÄR, A. JADING, Y., LINDSTRÖM, M., PARKVALL, S. Key Features of the LTE Radio Interface. Ericsson Review, Suécia. v. 2, 2008. Disponível em: <https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2008_02/files/6_LTE.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2016.
- [12] CELPLANNER: Descrição do Software. São Paulo. Disponível em: <http://www.celplan.com.br/uploads/files/celplan/02produtoseservicos/02ferramentadesoftware/01_celplanner.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2016.
- [13] LTE TDD frame. Disponível em: <http://niviuk.free.fr/lte_tdd.php>. Acesso em: 02 jun. 2016.
- [14] TEIXEIRA, M. 4G no Brasil. 04 set. 2015. Disponível em: <<https://techinbrazil.com.br/4g-no-brasil>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

- [15] ANATEL. Agência recebe propostas para licitação das faixas de 2,5 GHz e de 450 MHz. 05 jun. 2012. Disponível em: <
<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=25567>>.
Acesso em: 14 jun. 2016.
- [16] ANATEL. Banda Larga – Acessos. 14 fev. 2015. Disponível em: <
<http://www.anatel.gov.br/dados/index.php/component/content/article?id=269>>. Acesso em: 14 jun. 2016.
- [17] ERICSSON Mobility Report: On The Pulse of the Networked Society. Ericsson Report, nov. 2015. Disponível em: < <https://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf>> Acesso em: 17 jun. 2016.
- [18] KUMAR, P., PATIL, B., RAM, S. Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution (LTE) Network. International Journal of Engineering Research and General Science, Massachusetts. v. 3, jan./fev. 2015. Disponível em: <
<http://pnrsolution.org/Datacenter/Vol3/Issue1/48.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2016.
- [19] POOLE, I. Radio Propagation/Radiowave Propagation Overview: an overview or summary the different modes or ways for the propagation of radio waves. Disponível em: < <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/radio-propagation/radio-propagation-overview-tutorial.php>>. Acesso em: 17 jun. 2016.
- [20] ANATEL. Certificado de Homologação. 31 out. 2011. Disponível em: <
<http://sistemas.anatel.gov.br/sgch/HistoricoCertificado/Homologacao.asp?NumRFGCT=286211&idtHistoricoCert=10150129>>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- [21] TONGYU Communication: TYDA-2616D4T6 Manual. Disponível em: <
<http://sistemas.anatel.gov.br/sgch/Funcoes/Anexar/VerAnexo.asp?hdnIdtArquivo=7B899101-8CE4-4B4C-9D7F-A9001417ACE1>>. Acesso em 21 jun. 2016.

ANEXO I – Tabela de eNodeBs

Tabela I.1 - Relação de células do Distrito Federal.

Regiões Administrativas	Células	Azimute atual	Tilt mecânico atual
Águas Claras	DFACL2-1	0	5
	DFACL2-2	120	2
	DFACL2-3	210	6
	DFACL1-1	0	3
	DFACL1-2	90	2
	DFACL1-3	220	6
	DFACL3-1	15	10
	DFACL3-2	120	8
	DFACL3-3	210	12
	DFACL4-1	20	8
	DFACL4-2	230	8
	DFACL4-3	290	1
	DFACL5-1	80	3
	DFACL5-2	220	1
	DFACL5-3	310	5
	DFACL6-1	70	8
	DFACL6-2	200	3
	DFACL6-3	320	4
	DFACL7-1	40	8
	DFACL7-2	180	10
	DFACL7-3	290	9
	DFACL8-1	60	7
	DFACL8-2	190	8
	DFACL8-3	330	4
	DFACL9-1	100	5
	DFACL9-2	205	5
	DFACL9-3	300	10
Ceilândia	DFCEI01-1	320	-2
	DFCEI01-2	65	-4.5
	DFCEI01-3	220	-4.5
	DFCEI02-1	300	-2
	DFCEI02-2	65	0.5
	DFCEI02-3	190	-5.5
	DFCEI03-1	15	-2
	DFCEI03-2	190	-4
	DFCEI03-3	285	-2.7
	DFCEI04-1	60	-4.4
	DFCEI04-2	185	-1
	DFCEI04-3	325	-4.5
	DFCEI05-1	25	-3
	DFCEI05-2	110	2
	DFCEI05-3	265	-1
	DFCEI06-1	350	-1
	DFCEI06-2	95	-5
	DFCEI06-3	240	-5
	DFCEI07-1	60	-2

Ceilândia	DFCEI07-2	140	2
	DFCEI07-3	280	-2
	DFCEI08-1	320	0
	DFCEI08-2	140	2
	DFCEI08-3	220	-3
	DFCEI09-1	60	-2
	DFCEI09-2	220	2
	DFCEI09-3	300	-2
	DFCEI10-1	350	-2
	DFCEI10-2	100	-2
	DFCEI10-3	210	0
	DFCEI11-1	335	-2
	DFCEI11-2	70	0
	DFCEI11-3	220	0
	DFCEI12-1	30	0
	DFCEI12-2	130	0
	DFCEI12-3	270	0
	DFCEI13-1	330	0
	DFCEI13-2	110	0
	DFCEI13-3	220	0
	DFCEI14-1	15	0
	DFCEI14-2	125	0
	DFCEI14-3	265	0
Gama	DFGAM1-1	65	3
	DFGAM1-2	160	2
	DFGAM1-3	320	0
	DFGAM2-1	100	-4
	DFGAM2-2	210	3
	DFGAM2-3	0	-4
	DFGAM3-1	65	2
	DFGAM3-2	150	-2
	DFGAM3-3	310	3
	DFGAM4-1	40	-5
	DFGAM4-2	165	3
	DFGAM4-3	280	-2
	DFGAM5-1	55	-2
	DFGAM5-2	175	-4
	DFGAM5-3	275	0
	DFGAM6-1	85	1
	DFGAM6-2	185	-3
	DFGAM6-3	315	-2
	DFGAM7-1	0	0
	DFGAM7-2	120	0
	DFGAM7-3	240	0
Guará	DFGUA1-1	80	3
	DFGUA1-2	200	0
	DFGUA1-3	340	-4
	DFGUA2-1	40	-3
	DFGUA2-2	200	3
	DFGUA2-3	290	0

Guará	DFGUA3-1	25	-1
	DFGUA3-2	120	-2
	DFGUA3-3	280	-1
Candangolândia	DFGUA4-1	30	-3
	DFGUA4-2	120	-4
	DFGUA4-3	280	-1
Núcleo Bandeirante	DFGUA5-1	25	-4
	DFGUA5-2	160	-3
	DFGUA5-3	275	-3
Guará	DFGUA6-1	65	-3
	DFGUA6-2	195	0
	DFGUA6-3	295	-1
Lago Norte	DFLGN1-1	0	-2
	DFLGN1-2	100	-4
	DFLGN1-3	285	-2
	DFLGN2-1	10	0
	DFLGN2-2	115	-2
	DFLGN2-3	300	-2
	DFLGN3-1	5	-4
	DFLGN3-2	120	-3
	DFLGN3-3	280	2
Lago Sul	DFLGS1-1	30	-1
	DFLGS1-2	200	-1
	DFLGS1-3	300	-1
	DFLGS2-1	90	-4
	DFLGS2-2	180	-5
	DFLGS2-3	250	-3
	DFLGS3-1	0	-3
	DFLGS3-2	120	-6
	DFLGS3-3	230	-1
	DFLGS4-1	40	-1
	DFLGS4-2	130	-4
	DFLGS4-3	230	-3
	DFLGS5-1	350	2
	DFLGS5-2	80	-2
	DFLGS5-3	250	-5
	DFLGS6-1	340	-2
	DFLGS6-2	110	-5
	DFLGS6-3	240	-1
	DFLGS7-1	40	-1
	DFLGS7-2	90	-2
	DFLGS7-3	200	-5
Plano Piloto	DFPLP01-1	110	6
	DFPLP01-2	230	7
	DFPLP01-3	340	5
	DFPLP02-1	340	2
	DFPLP02-2	100	-2
	DFPLP02-3	220	-2
	DFPLP03-1	305	-2
	DFPLP03-2	60	-2

Plano Piloto	DFPLP03-3	190	1
	DFPLP04-1	320	5
	DFPLP04-2	80	-6
	DFPLP04-3	220	-1
	DFPLP05-1	10	3
	DFPLP05-2	110	2
	DFPLP05-3	220	0
	DFPLP06-1	330	-3
	DFPLP06-2	80	4
	DFPLP06-3	220	2
	DFPLP07-1	0	-1
	DFPLP07-2	130	2
	DFPLP07-3	230	0
	DFPLP08-1	320	-2
	DFPLP08-2	80	-1
	DFPLP08-3	210	1
	DFPLP09-1	350	1
	DFPLP09-2	110	0
	DFPLP09-3	220	0
	DFPLP10-1	330	-2
	DFPLP10-2	90	2
	DFPLP10-3	210	0
	DFPLP11-1	0	-2
	DFPLP11-2	120	-1
	DFPLP11-3	230	-1
	DFPLP12-1	70	5
	DFPLP12-2	245	0
	DFPLP12-3	330	1
	DFPLP13-1	60	0
	DFPLP13-2	190	-2
	DFPLP13-3	300	-4
	DFPLP14-1	60	2
	DFPLP14-2	170	-2
	DFPLP14-3	280	0
	DFPLP15-1	55	1
	DFPLP15-2	145	-4
	DFPLP15-3	300	2
	DFPLP16-1	60	4
	DFPLP16-2	170	-2
	DFPLP16-3	290	-1
	DFPLP17-1	50	2
	DFPLP17-2	170	-2
	DFPLP17-3	260	3
	DFPLP18-1	60	-1
	DFPLP18-2	150	0
	DFPLP18-3	270	-3
	DFPLP19-1	60	0
	DFPLP19-2	190	-1
	DFPLP19-3	295	-2
	DFPLP20-1	85	-4

Plano Piloto	DFPLP20-2	195	0
	DFPLP20-3	300	2
Paranoá	DFPNA1-1	355	-1
	DFPNA1-2	130	-2
	DFPNA1-3	235	0
	DFPNA2-1	355	-2
	DFPNA2-2	115	-1
	DFPNA2-3	245	-2
	DFPNA3-1	350	2
	DFPNA3-2	120	2
	DFPNA3-3	210	2
Park Way	DFPWY1-1	45	1
	DFPWY1-2	140	0
	DFPWY1-3	320	1
	DFPWY2-1	55	-2
	DFPWY2-2	195	-4
	DFPWY2-3	295	0
	DFPWY3-1	0	-2
	DFPWY3-2	70	-4
	DFPWY3-3	220	-1
	DFPWY4-1	10	-3
	DFPWY4-2	110	-3
	DFPWY4-3	250	-4
	DFPWY5-1	60	1
	DFPWY5-2	180	-4
	DFPWY5-3	320	-4
	DFPWY6-1	0	3
	DFPWY6-2	120	3
	DFPWY6-3	230	3
	DFPWY7-1	315	-2
	DFPWY7-2	80	-1
	DFPWY7-3	220	-3
Recanto das Emas	DFREM1-1	45	-3
	DFREM1-2	140	-3
	DFREM1-3	290	-1
	DFREM2-1	65	0
	DFREM2-2	160	-1
	DFREM2-3	270	-1
	DFREM3-1	50	-4
	DFREM3-2	150	-2
	DFREM3-3	285	-1
	DFREM4-1	30	0
	DFREM4-2	130	-1
	DFREM4-3	220	-1
	DFREM5-1	190	-1
	DFREM5-2	295	-2
	DFREM5-3	115	-1
Samambaia	DFSAM1-1	0	0
	DFSAM1-2	120	-1
	DFSAM1-3	230	-4

Samambaia	DFSAM2-1	340	0
	DFSAM2-2	90	-1
	DFSAM2-3	240	-1
	DFSAM3-1	335	0
	DFSAM3-2	95	0
	DFSAM3-3	210	1
	DFSAM4-1	300	2
	DFSAM4-2	85	2
	DFSAM4-3	200	-2
	DFSAM5-1	335	0
	DFSAM5-2	100	0
	DFSAM5-3	230	0
	DFSAM6-1	20	2
	DFSAM6-2	150	2
	DFSAM6-3	250	2
Sobradinho	DFSOB1-1	315	-5
	DFSOB1-2	80	-1
	DFSOB1-3	180	-2
	DFSOB2-1	30	-4
	DFSOB2-2	160	-3
	DFSOB2-3	280	0
	DFSOB3-1	10	-4
	DFSOB3-2	130	-4
	DFSOB3-3	265	0
	DFSOB4-1	60	4
	DFSOB4-2	160	0
	DFSOB4-3	300	-5
Sudoeste	DFSUD1-1	315	-4
	DFSUD1-2	35	-2
	DFSUD1-3	240	1
	DFSUD2-1	0	-5
	DFSUD2-2	120	0
	DFSUD2-3	230	1
	DFSUD3-1	10	3
	DFSUD3-2	120	1
	DFSUD3-3	220	2
	DFSUD4-1	310	0
	DFSUD4-2	120	2
	DFSUD4-3	220	0
	DFSUD5-1	0	2
	DFSUD5-2	130	-2
	DFSUD5-3	250	2
	DFSUD6-1	320	0
	DFSUD6-2	50	0
	DFSUD6-3	180	2
Taguatinga	DFTAG1-1	15	0
	DFTAG1-2	190	-3
	DFTAG1-3	285	-3
	DFTAG2-1	40	-2
	DFTAG2-2	155	-3

Taguatinga	DFTAG2-3	270	-3
	DFTAG3-1	60	-1
	DFTAG3-2	160	-1
	DFTAG3-3	270	-3
	DFTAG4-1	50	-1
	DFTAG4-2	160	-1
	DFTAG4-3	250	-2
Valparaíso	DFVPI1-1	45	1
	DFVPI1-2	195	4
	DFVPI1-3	305	3
	DFVPI2-1	80	0
	DFVPI2-2	205	3
	DFVPI2-3	330	-2
	DFVPI3-1	50	4
	DFVPI3-2	195	2
	DFVPI3-3	310	-3
	DFVPI4-1	70	-1
	DFVPI4-2	205	0
	DFVPI4-3	315	-4
	DFVPI5-1	90	3
	DFVPI5-2	205	2
	DFVPI5-3	330	-3

ANEXO II – Cobertura de cada Região Administrativa

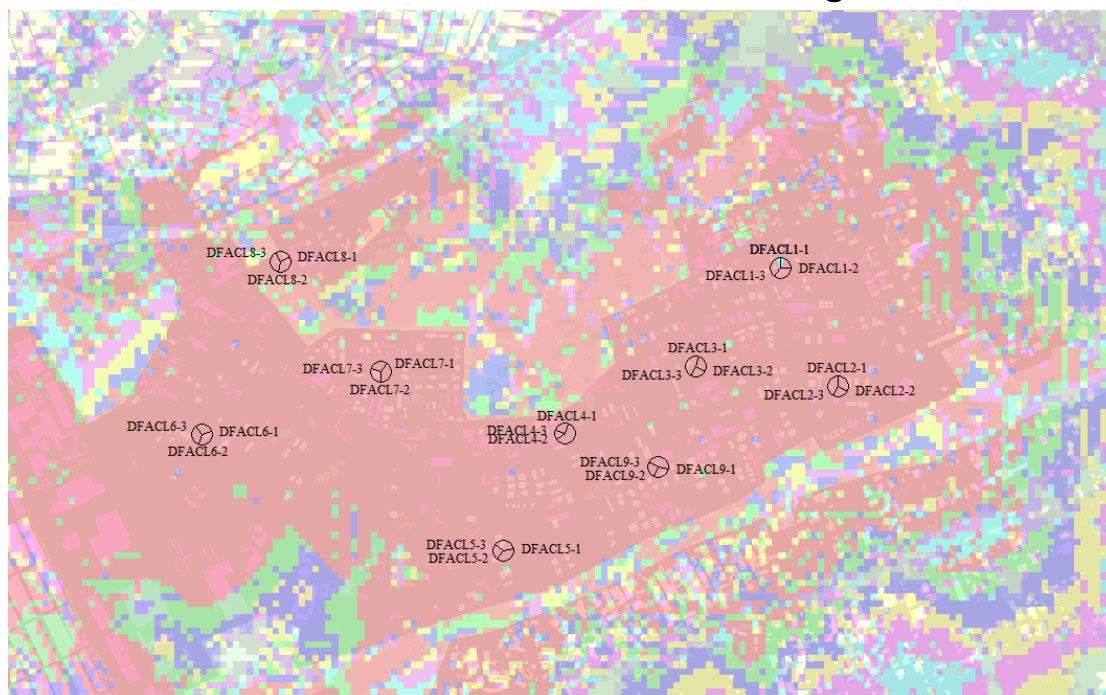


Figura II.1 - Predição de cobertura em Águas Claras.

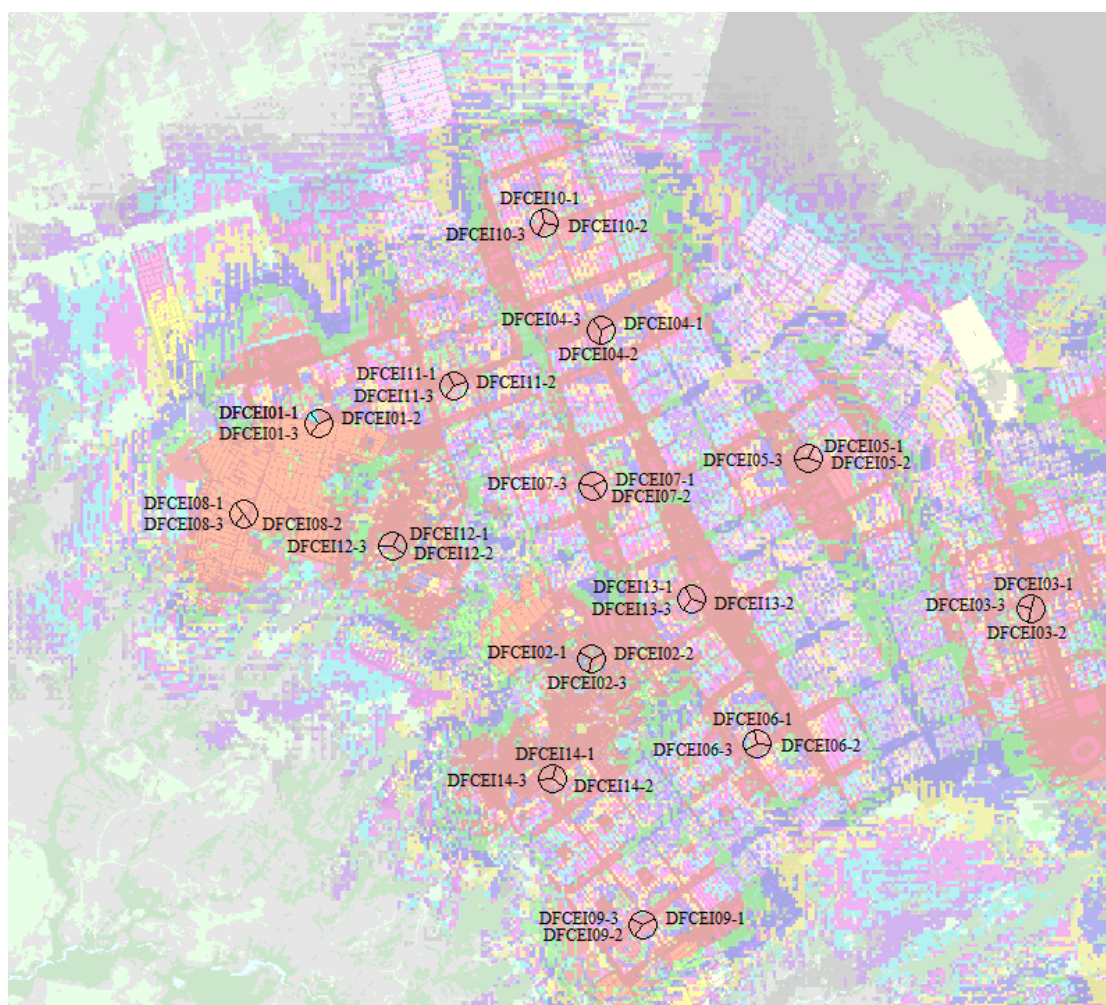


Figura II.2 - Predição de cobertura em Ceilândia.

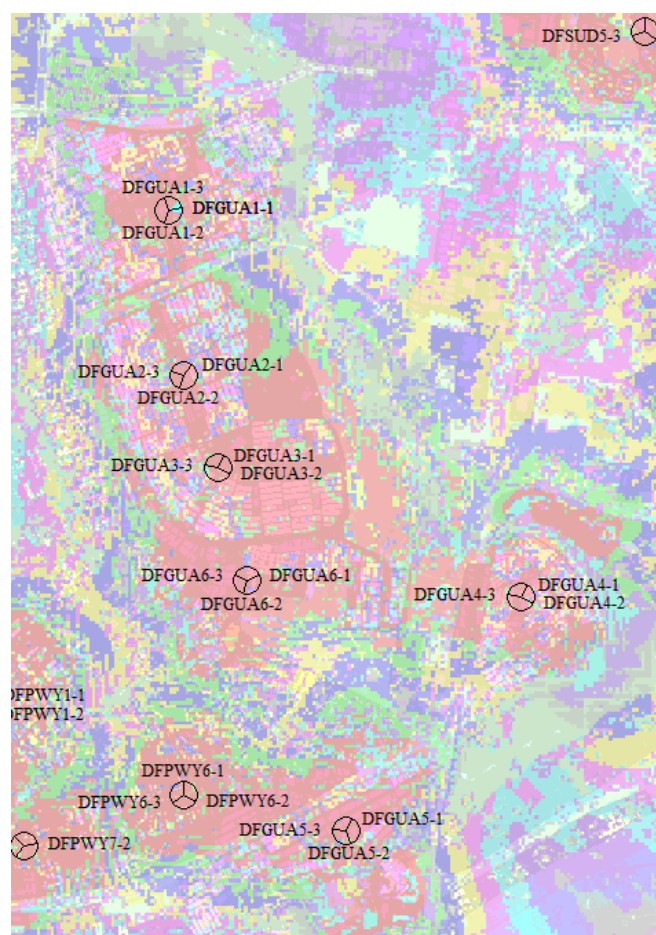


Figura II.3 - Predição de cobertura no Guarará, Núcleo Bandeirante e Candangolândia.

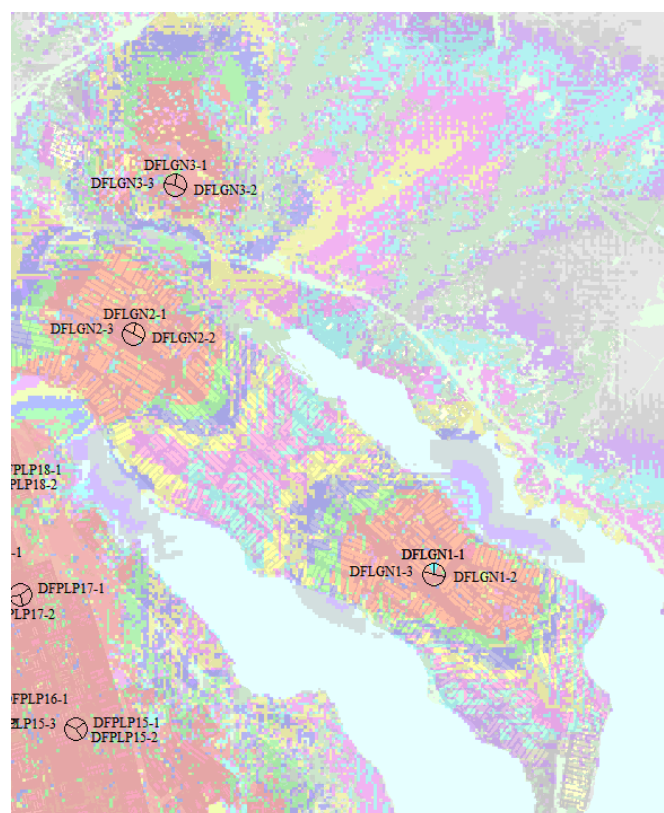


Figura II.4 - Predição de cobertura no Lago Norte.

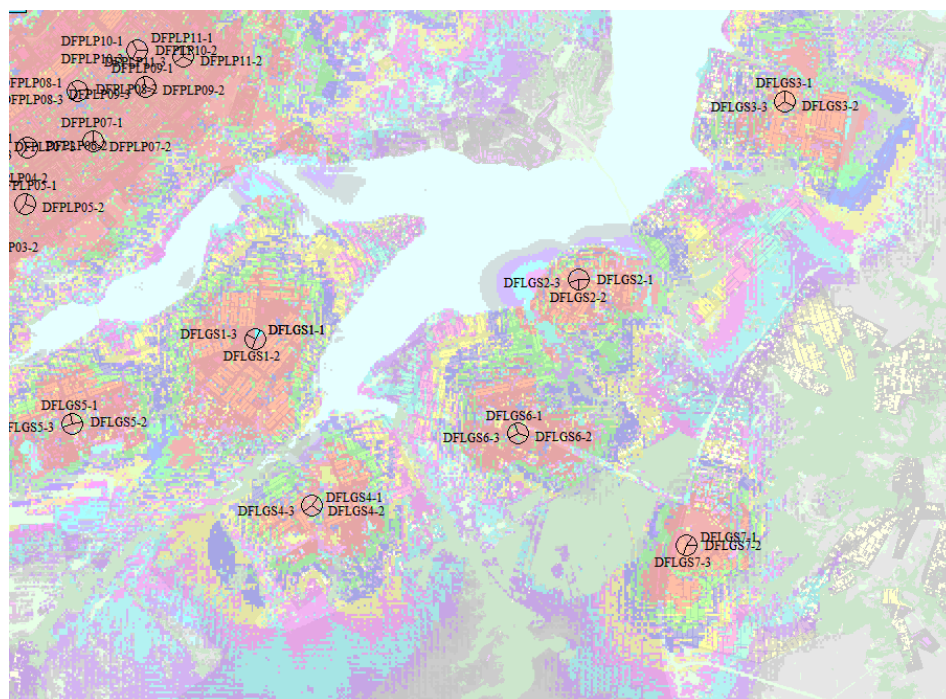


Figura II.5 - Predição de cobertura no Lago Sul.

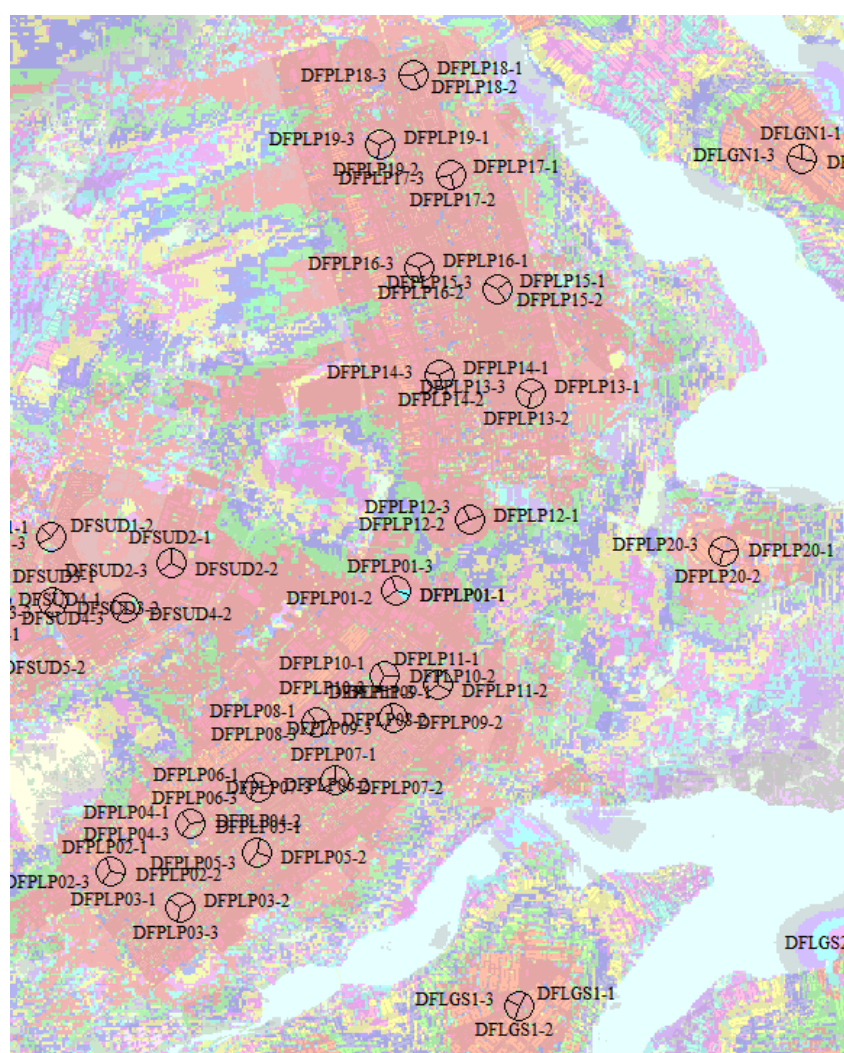


Figura II.6 - Predição de cobertura no Plano Piloto.

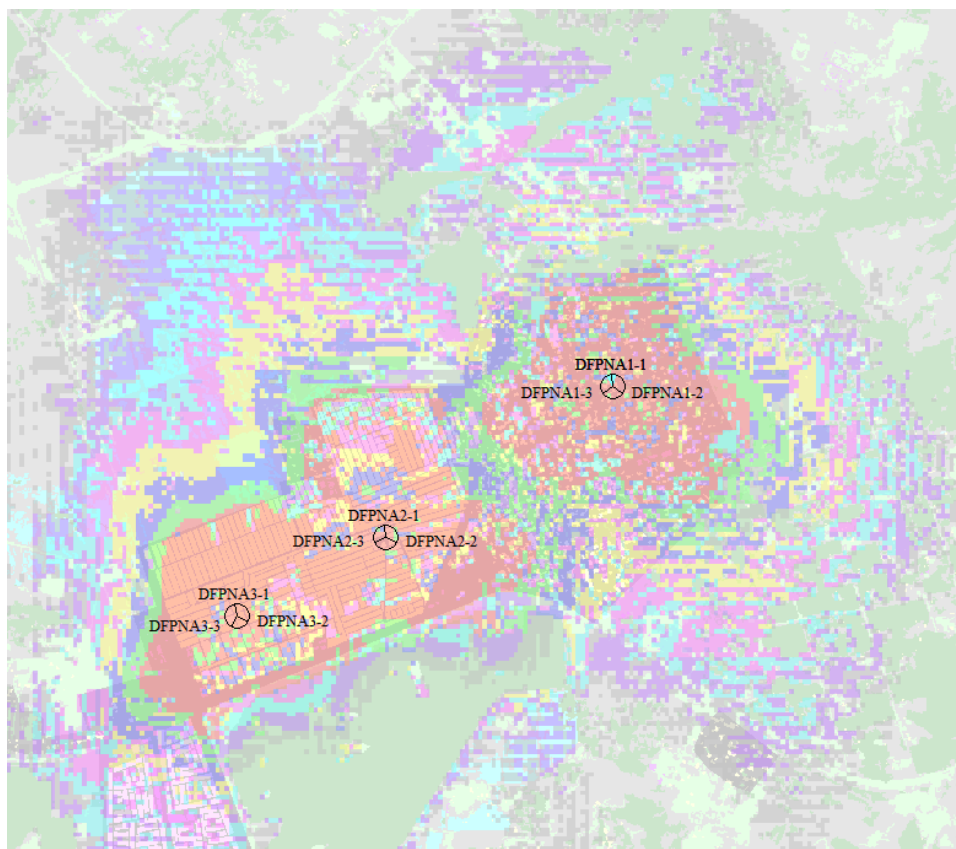


Figura II.7 - Predição de cobertura no Paranoá.

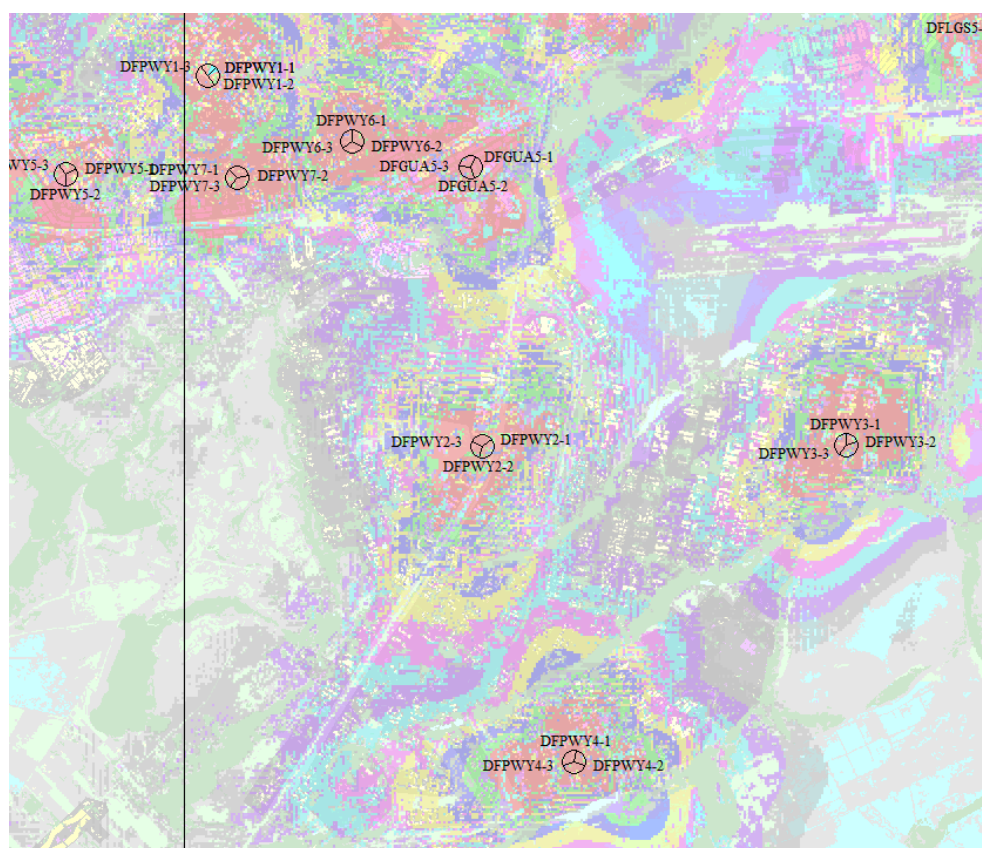


Figura II.8 - Predição de cobertura no Park Way.

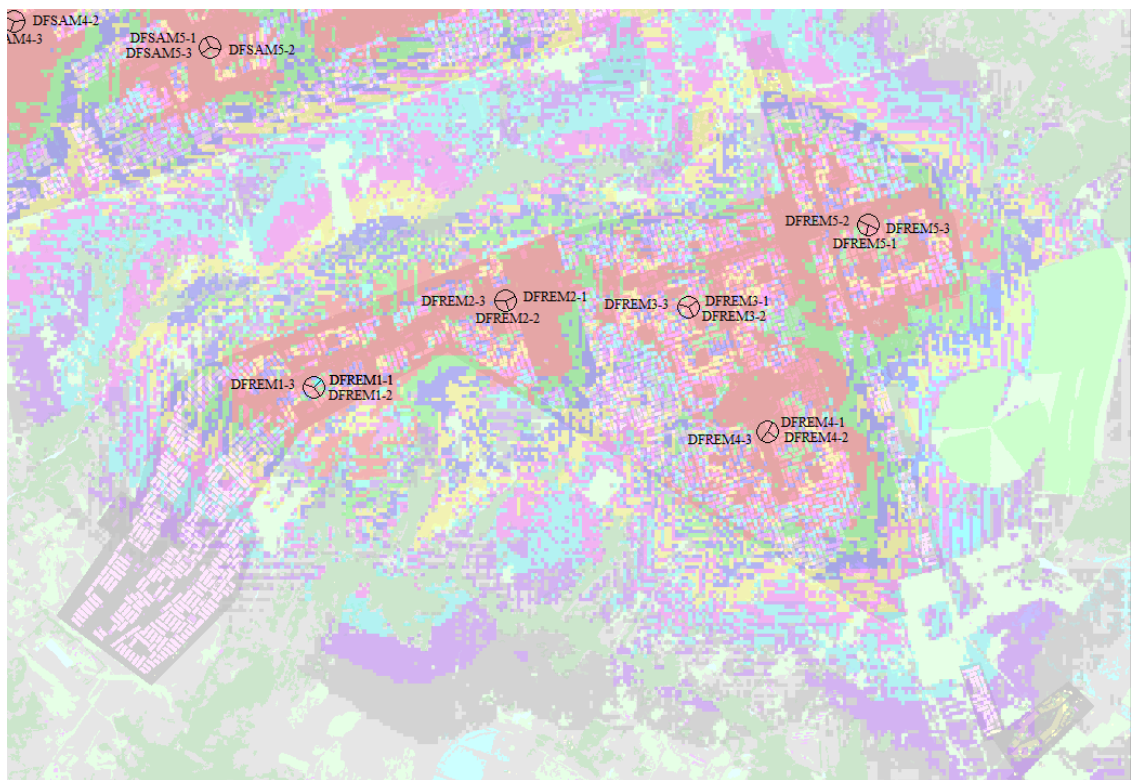


Figura II.9 - Predição de cobertura em Recanto das Emas.

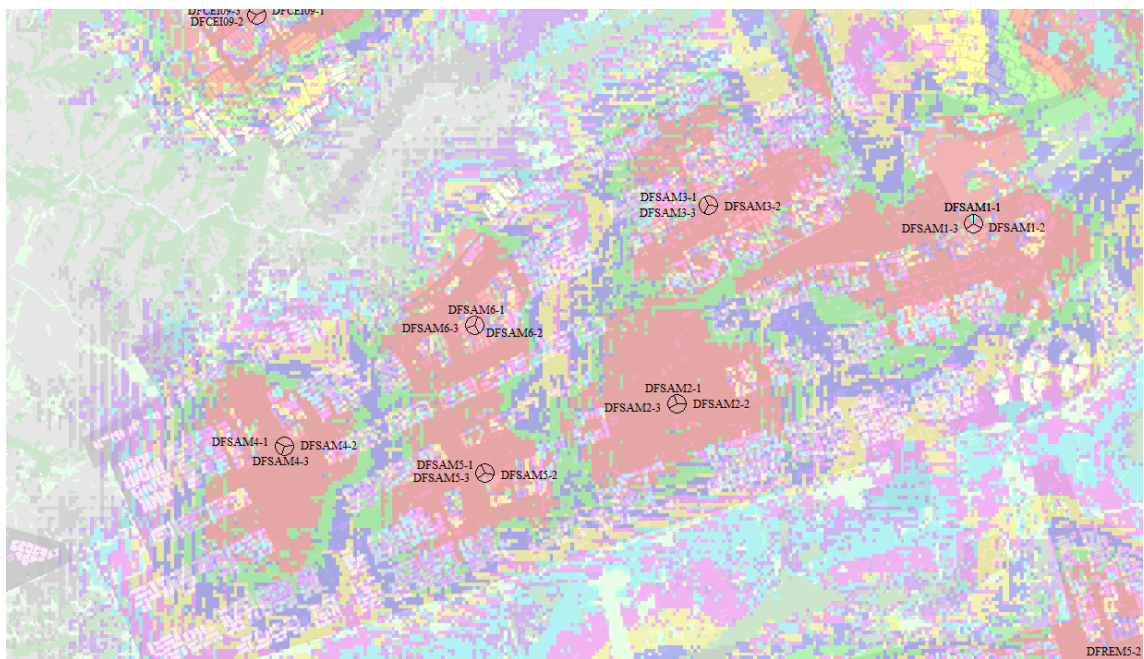


Figura II.10 - Predição de cobertura em Samambaia.

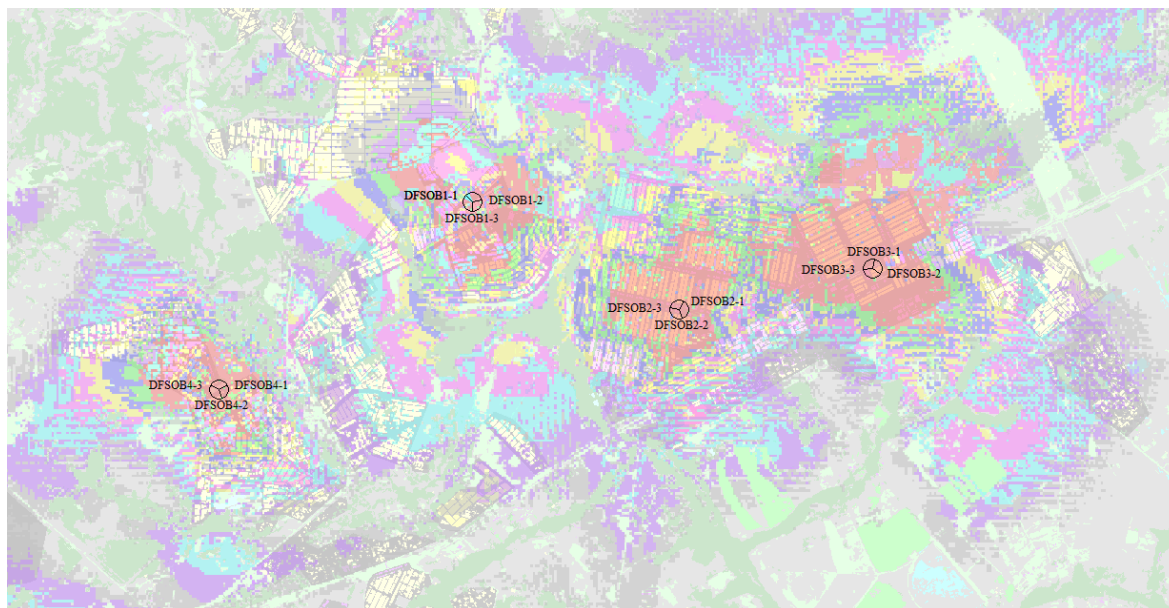


Figura II.11 - Predição de cobertura em Sobradinho.

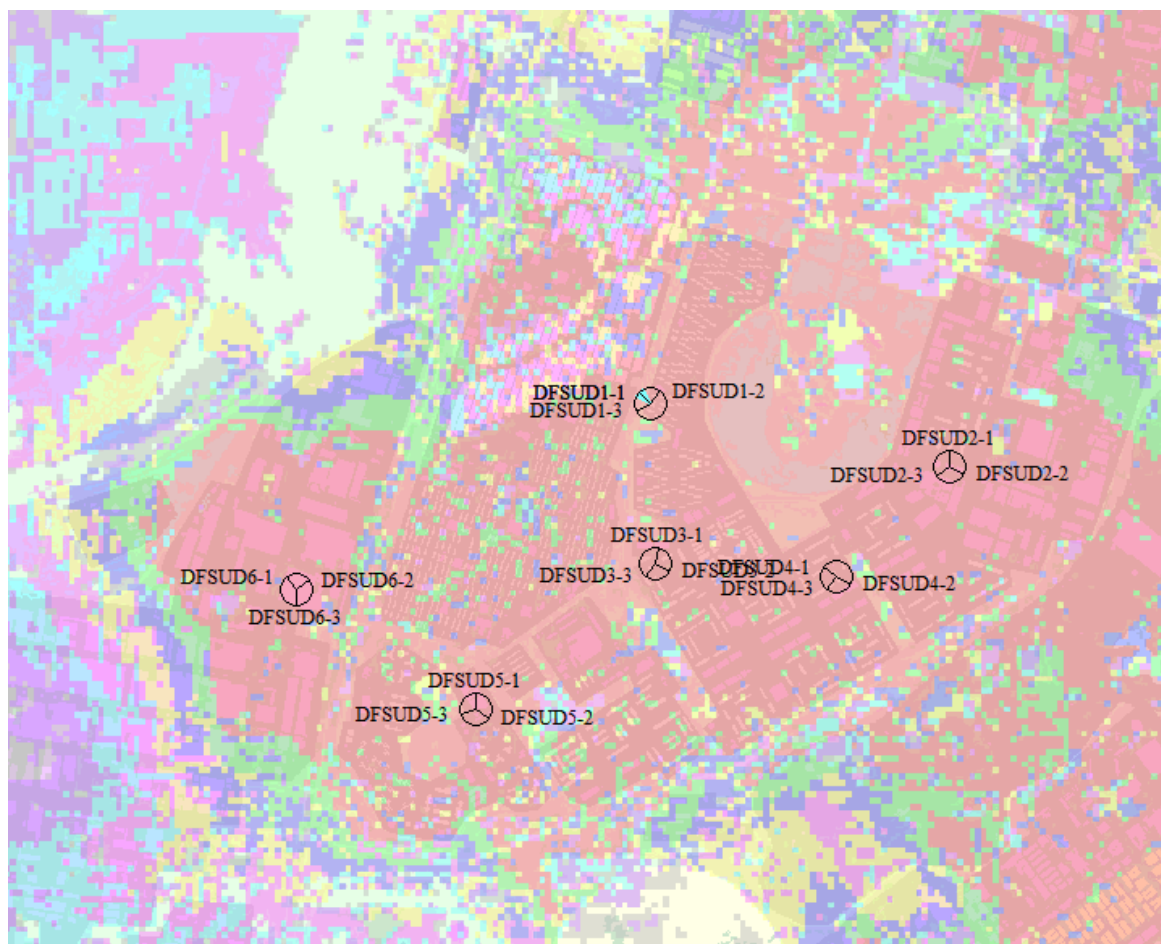


Figura II.12 - Predição de cobertura no Sudoeste.

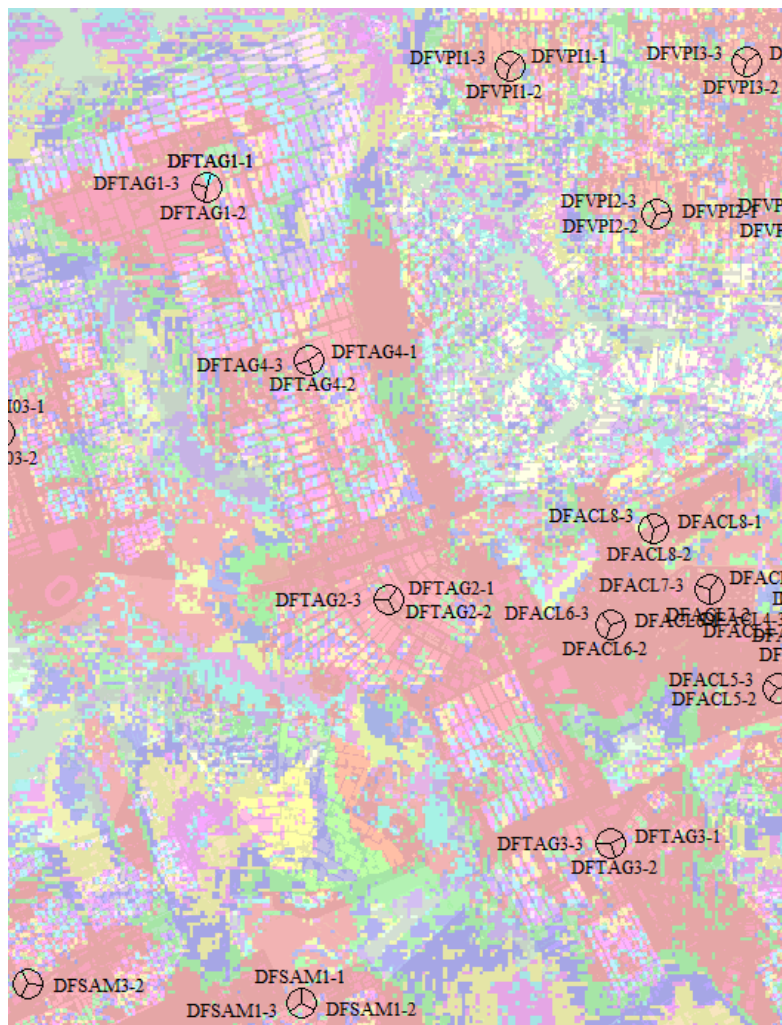


Figura II.13 - Predição de cobertura em Taguatinga.

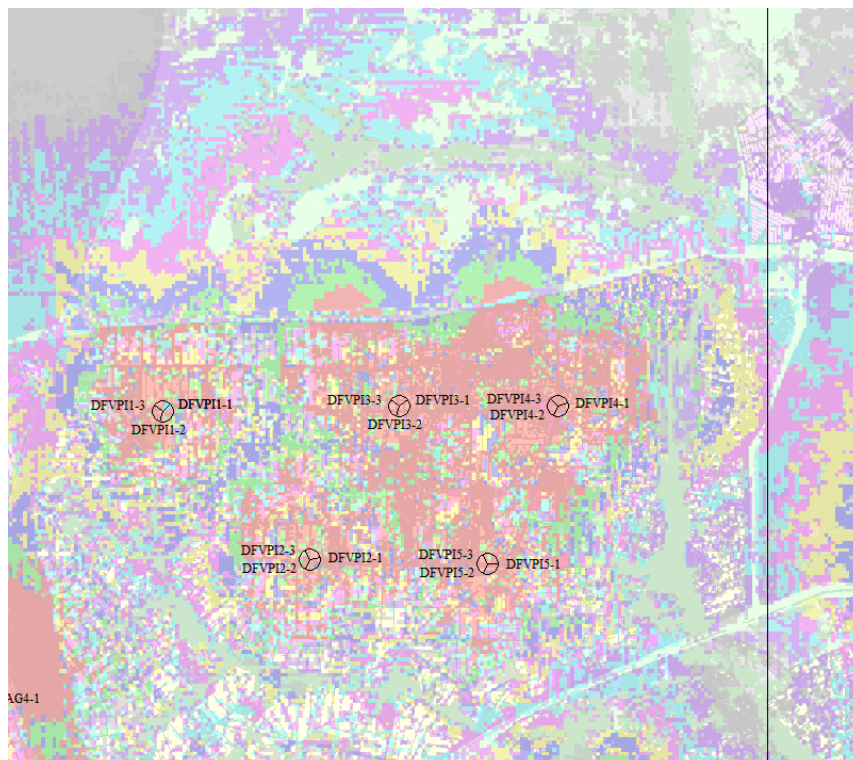


Figura II.14 - Predição de cobertura em Valparaíso.