

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PLANEJAMENTO DE REDE LTE UTILIZANDO APROXIMAÇÃO
HÍBRIDA DE MODELO EMPÍRICO OUTDOOR : MEDIÇÃO E
TÉCNICA DE ALGORITMO GENÉTICO**

MÁRCIO RODRIGUES PINHEIRO

DM – 14/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
BELÉM - PARÁ
2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MÁRCIO RODRIGUES PINHEIRO

**PLANEJAMENTO DE REDE LTE UTILIZANDO APROXIMAÇÃO
HÍBRIDA DE MODELO EMPÍRICO OUTDOOR : MEDIÇÃO E
TÉCNICA DE ALGORITMO GENÉTICO**

DM – 14/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
BELÉM - PARÁ
2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MÁRCIO RODRIGUES PINHEIRO

**PLANEJAMENTO DE REDE LTE UTILIZANDO APROXIMAÇÃO
HÍBRIDA DE MODELO EMPÍRICO OUTDOOR : MEDIÇÃO E
TÉCNICA DE ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho submetido à Banca Examinadora do programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Telecomunicações. Orientador: Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante.

UFPA / ITEC / PPGEE

BELÉM - PARÁ

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Pinheiro, Márcio Rodrigues, 1982-

Planejamento de rede lte utilizando aproximação híbrida de modelo empírico outdoor : médio e técnica de algoritmo genético / Márcio Rodrigues Pinheiro. - 2015.

Orientador: Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2015.

1. Ondas de rádio - propagação - medição. 2. sistemas de comunicação móvel. 3. algoritmos genéticos. I. Título.

CDD 22. ed. 621.38411

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PLANEJAMENTO DE REDE LTE UTILIZANDO APROXIMAÇÃO
HÍBRIDA DE MODELO EMPÍRICO OUTDOOR : MEDIÇÃO E
TÉCNICA DE ALGORITMO GENÉTICO**

AUTOR: MARCIO RODRIGUES PINHEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante - UFPA
Orientador

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes - UFPA
Membro

Prof. Dr. Josiane Couto Rodrigues - IESAM
Membro

Visto:

Ao amor da minha vida, minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado, dando-me saúde e guiando meus passos, para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Aos meus pais por serem meu alicerce e meus principais incentivadores na busca dos meus sonhos através dos estudos e do comprometimento.

Agradeço pela atenção e ajuda que meus colegas do laboratório LCT tiveram comigo, mesmo eu não sendo um frequentador assíduo no laboratório, sempre que precisei obtive a colaboração dos mesmos. Destacando minha querida professora Josiane e o amigo Bruno.

À TIM S.A que permitiu que a realização deste trabalho, cedendo informações importantes para as simulações feitas aqui, assim como, aos meus gestores pela compreensão neste período de estudo.

Ao auxílio e trocas de experiências com minhas amigas de trabalho e profissão Regiane Barbosa, Milene Alcântara e Larissa Janaú.

Aos meus amigos do coração Juliana Monteiro, Monaldo Begot e Márcio Leal que acompanharam de perto esse momento, oferecendo sempre conselhos e motivação para o término do mesmo.

E por fim, gostaria de expressar minha gratidão principalmente ao professor e meu orientador Gervásio Cavalcante pela confiança depositada a mim e pela oportunidade que me concedeu. A professora Doutora Jasmine por ser um verdadeiro anjo na minha vida e no meu mestrado, surgindo sempre nos momentos que mais precisava. Ao meu grande amigo Doutor Gilvan Borges pela ajuda na programação e implementação do algoritmo genético e demais ajudas. Estes foram sem dúvida decisivo para o término deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ACRÔNICOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVAÇÃO	1
1.2 - OBJETIVOS	2
1.3 - CONTRIBUIÇÕES	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE RÁDIO	4
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
2.2 - FAIXAS DE FREQUÊNCIAS DAS ONDAS DE RÁDIO	4
2.3 - MECANISMOS E EFEITOS DE PROPAGAÇÃO	5
2.3.1 - Reflexão	5
2.3.2 - Difração	6
2.3.3 - Refração	7
2.3.4 - Espalhamento	8
2.3.5 - Multipercurso	8
2.4 – PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE	9
2.5 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
CAPÍTULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO	11
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
3.2 - IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	11
3.2.1 - Modelos Determinísticos	11
3.2.2 - Modelos Empíricos	12
3.2.2.1 - Modelo Okumura-Hata	12
3.2.2.2 - Modelo ECC - 33	13
3.2.2.3 - Modelo IEEE 802.16 (Modelo SUI)	14
3.2.2.4 - Modelo UFPA	16
3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
CAPÍTULO 4 – ALGORITMO GENÉTICO	19
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
4.2 - HISTORICO DO ALGORITMO GENETICO A PARTIR DAS TEORICAS EVOLUTIVAS	19
4.3 – CONCEITOS E TERMINOLOGIAS DE ALGORITMO GENÉTICO	20
4.4 – ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENÉTICO	21
4.4.1 - Inicialização	23
4.4.2 - Avaliação	23
4.4.3 – Operadores Genéticos	24
4.4.3.1 - Seleção	24
4.4.3.2 - Crossover	26
4.4.3.3 - Mutação	28
4.4.4 – Critério de Parada	29
4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
CAPÍTULO 5 – FUNDAMENTOS DA REDE LTE	30
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30

5.2 - HISTORICO DA REDE LTE	30
5.3 - ARQUITETURA DA REDE LTE	31
5.3.1 - Rede de Acesso E-UTRAN	33
5.3.2 - Núcleo de rede EPC	34
5.3.2.1 - Mobility Management Entity (MME)	34
5.3.2.2 - Serving Gateway (S-GW)	35
5.3.2.3 - Packet Data Network Gateway (P-GW)	35
5.4 - A Camada MAC no LTE	36
5.4.1 - Canais Lógicos	36
5.4.2 - Canais de Transporte	36
5.5 – A CAMADA FISICA LTE	36
5.5.1 – Técnica de Multiplo Acesso OFDMA	37
5.5.2 – Técnica de Multiplo Acesso SC-FDMA	38
5.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
CAPÍTULO 6 – CAMPANHA DE MEDIÇÃO	39
6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
6.2 - COLETA DE DADOS	39
6.3 – CONFIGURAÇÃO DO TRANSMISSOR	40
6.4 – CONFIGURAÇÃO DO RECEPTOR	41
6.5 – CONFIGURAÇÕES DAS ROTAS	43
6.6 - COMPARAÇÕES DAS MEDIÇÕES COM MODELOS ESTUDADOS	45
6.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E ANALISES	49
7.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	49
7.2 – OTIMIZAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS	49
7.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Reflexão para onda de rádio	6
Figura 2.2	Princípio de Huygens	7
Figura 2.3	Fenômeno da refração	7
Figura 2.4	Espalhamento do sinal	8
Figura 4.1	Fluxograma com etapas de um Algoritmo Genético	22
Figura 4.2	Método de crossover uniforme	27
Figura 4.3	Método de crossover de um ponto	27
Figura 4.4	Método de crossover de dois pontos	28
Figura 4.5	Processo de mutação	28
Figura 5.1	Arquitetura de rede LTE	32
Figura 6.1	Configuração rota B	39
Figura 6.2	Setorização das antenas	40
Figura 6.3	Interface do aplicativo G-NetTrack	41
Figura 6.4	Field Test LG	42
Figura 6.5	Configuração para acampar na rede LTE	42
Figura 6.6	Informações Coletadas através do <i>G-NetTrack</i>	43
Figura 6.7	Campanha de medição do site A e do site B	44
Figura 6.8	Caracterização da rota A	44
Figura 6.9	Comparação entre o modelo ECC e o sinal medido	46
Figura 6.10	Comparação entre o modelo SUI e o sinal medido	46
Figura 6.11	Comparação entre o modelo UFPA e o sinal medido	47
Figura 7.1	Comparação entre modelo ECC padrão e o ajustado	50
Figura 7.2	Comparação entre modelo SUI padrão e o ajustado	51
Figura 7.3	Comparação entre modelo UFPA padrão e o ajustado	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Designação das bandas de frequência	4
Tabela 3.1	Parâmetros relacionados aos tipos de terrenos	15
Tabela 5.1	Principais requisitos do release 8	31
Tabela 6.1	Desempenho dos modelos de propagação para os dados coletados	47
Tabela 7.1	Constantes otimizadas no modelo ECC	50
Tabela 7.2	Constantes otimizadas no modelo SUI	51
Tabela 7.3	Constantes otimizadas no modelo UFPA	52
Tabela 7.4	Desempenho dos modelos de propagação para dados coletados antes e após otimização	53

LISTA DE ACRÔNIMOS

3GPP	3 rd Generation Partnership
AG	Algoritmo Genético
DL	Download
eNodeB	Evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDM	Frequency Division Multiplex
FFT	Fast Fourier Transform
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Services
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term
MAC	Medium Access Control
MME	Mobility Management Entity
MSC	Mobile Switching Center
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnection
PAPR	Peak to Average Power Ratio
P-GW	Packet Data Network Gateway
QoS	Quality of Service
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
S-GW	Serving-Gateway
SUI	Stanford University Interim
UFPA	Universidade Federal do Pará
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

RESUMO

Atualmente é visível o aumento crescente das redes de comunicações móveis, no cenário das telecomunicações. A fim de suprir as demandas dos usuários mais exigentes por serviços móveis com taxas de transmissão de dados cada vez maiores, constantemente são desenvolvidas por parte das empresas ligadas ao setor das telecomunicações, novas tecnologias para acompanhar tais demandas. Como as redes 2G e 3G não conseguem mais comportar as exigências dos usuários atuais, pois não conseguem oferecer serviços de qualidade aos clientes em função das limitações de taxa de transferência de dados. Foi desenvolvido então, o sistema LTE (*Long Term Evolution*), que vem se tornando uma das soluções mais promissoras para atender a crescente demanda do setor das telecomunicações. Para que o sistema LTE, também denominado 4G, seja implementado de forma eficiente na rede, diversas ferramentas de simulação para predição de cobertura tem sido desenvolvidas. Grandes esforços têm sido investidos no desenvolvimento dessas ferramentas, com a finalidade que os valores preditos sejam os mais próximos possíveis da realidade, tornando-a elemento indispensável no planejamento da rede LTE. Neste contexto, o presente trabalho tem como finalidade o estudo e a otimização de modelos de perdas de propagações outdoor disponibilizados na literatura, que operam na faixa de frequência de 2,6GHz, com o intuito de proporcionar uma predição de perda de propagação mais precisa para o ambiente estudado. Para tanto, campanhas de medições de sinal foram realizadas na cidade de Belém a fim de comparar quão satisfatórias são os ajustes dos modelos de perdas de propagação com a perda do sinal medido nas rotas realizadas. Foi observado que em determinadas medições, os modelos de perda de propagação, não apresentaram curvas similares ao que foi medido nas rotas realizadas, apresentando erro de predição elevado. Desta forma, técnica de otimização foi utilizada a todos os modelos de predição a partir de um Algoritmo Genético (AG). Através dessa técnica, foi possível chegar a uma melhora significativa dos modelos estudados em comparação as perdas encontradas nas rotas realizadas, contribuindo assim no planejamento mais eficiente para redes que operam na faixa de 2,6GHz do LTE.

Palavras-chave: Modelos de propagação *outdoor*, *wireless*, 2.6GHz, campanha de medição, LTE, algoritmo genético.

ABSTRACT

Currently, it is visible the growing number of mobile communications networks in the telecommunications scenario. In order to supply the demands of the most demanding users of mobile services with data transmission rates increasing constantly are developed by companies linked to the telecommunications industry, new technologies to keep up with these demands. As 2G and 3G networks can no longer bear the demands of current users because they can not provide quality services to customers due to limitations of data transfer rate. It was then developed, the LTE system (Long Term Evolution), which has become one of the most promising solutions to meet the growing demand of the telecommunications sector. In the LTE system, also called 4G is implemented efficiently on the network, various simulation tools to cover prediction has been developed. Great efforts have been invested in the development of these tools, in order that the predicted values are the closest possible to reality, making it indispensable in planning the LTE network. In this context, this paper is intended to study and optimization of outdoor propagation loss models available in the literature, operating in the 2.6GHz frequency range, in order to provide a propagation loss prediction more accurate the study environment. Therefore, signal measurements campaigns were held in Bethlehem in order to compare how satisfactory are the adjustments of the models of propagation loss with the signal loss measured in realized routes. It was observed that in certain measurements, models of propagation loss, did not show similar curves to that measured on the routes taken, showing high prediction error. Thus, optimization technique was used for all prediction models based on a Genetic Algorithm (GA). Through this technique, it was possible to achieve a significant improvement of the models studied compared the losses encountered on the routes taken, thus contributing to more efficient planning for networks operating in the LTE 2.6GHz range.

Keywords: Propagation Loss outdoor Models, wireless, 2.6GHz, measurement campaign, LTE, genetic algorithm.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Para que os sistemas de comunicações móveis sejam implementados com eficiente cobertura, é necessário o desenvolvimento de métodos de simulação, para predição de cobertura que se aproximem da realidade do melhor modo possível, de forma, que se possam tornar ferramentas fiéis e indispensáveis ao planejamento dos sistemas de comunicações sem fio. A propagação do sinal rádio móvel em ambientes *outdoor* é influenciado por vários fatores como: grandes construções, características de relevo e topografia do ambiente, copa das árvores, dentre outras. Portanto, as perdas percebidas nos sinais transmitidos em comunicações móveis ocorrem devido principalmente a: reflexão, multipercurso e difração que estão diretamente relacionadas aos fatores mencionados acima. Desta forma, caracterizar a perda de propagação em ambientes tão heterogêneos se torna uma tarefa difícil. Para realizar a predição dessas perdas, foram desenvolvidos modelos de propagação empíricos que são descritos na literatura. No entanto, os modelos existentes na literatura foram desenvolvidos antes do advento do LTE. Deste modo, se faz necessário um estudo comparativo que mostre os desempenhos dos modelos em relação às perdas de propagações medidas na faixa de 2,6GHz. Para se averiguarr a necessidade de adequação desses modelos, foi realizada uma campanha de medição em uma cidade de região Norte do Brasil. Na qual verificou-se que os modelos de propagação apresentaram erro de predição bastante elevados. Diante deste resultado, foi elaborando uma metodologia de ajuste desses modelos de propagação baseada em Algoritmo Genético (AG) com o objetivo de melhorar seus desempenhos na predição de atenuação para ambientes *outdoor*.

1.1 – MOTIVAÇÃO

O crescente avanço das tecnologias nas redes de comunicações móveis e a chegada do 3G (UMTS), o mundo vem descobrindo as facilidades e comodidades de acessar a internet, de qualquer lugar e a qualquer momento, desde que o usuário esteja sob a cobertura de uma rede celular. Justamente por essa maior interação do usuário e a troca de enormes quantidades de informações, como textos, gráficos, áudio e vídeo, vem contribuindo para que operadoras e centros de pesquisas no mundo todo, estejam sempre preocupadas com o desenvolvimento de tecnologias mais rápidas e que comportem cada vez mais tráfegos de dados para os usuários.

É neste cenário que surge a tecnologia LTE, como uma evolução natural para a atual rede 3G (UMTS) difundida pelo mundo, que irá possibilitar o tráfego de serviços de grandes

volumes de dados e com altas taxas ao usuário. Isso se deve porque o LTE traz consigo elementos importantes que o tornam o principal sucessor do 3G como maior eficiência espectral, redução de latência, taxas de dados elevadas, melhorias de capacidade e menor susceptibilidade a interferências.

Por ser uma tecnologia nova e que ainda está em plena expansão no Brasil, ainda existem muitas dúvidas sobre como será o comportamento da rede 4G, principalmente no que se refere à cobertura e alcance de suas antenas, pois somente com entendimento do comportamento de propagação desse novo sistema de comunicação, será possível o planejamento de uma rede completa, sem *GAPs* de cobertura para o assinante.

Visando a implementação com maior eficiência dos sistemas de comunicações móveis de quarta geração (4G), tem sido destinados bastantes esforços no desenvolvimento de métodos de simulação de predição de cobertura, com o objetivo que os mesmos se tornem ferramentas fieis no planejamento dos sistemas de comunicações LTE.

1.2 - OBJETIVOS

A importância atribuída aos modelos de perda de propagação na fase inicial em projetos de redes sem fio é indiscutível. Por isso, é extremamente necessária uma eficiente predição na perda de propagação obtida através dos modelos para que se tenha o valor mais próximo possível do sinal medido.

Este trabalho tem como objetivo realizar campanhas de medições de campo para caracterização do canal de radio propagação na frequência de 2,6 GHz na cidade de Belém do Pará, em bairros suburbanos com arborização média e construções de médio porte. Após realizar a medição do sinal LTE de uma operadora de Comunicações Móveis multinacional, serão comparados os modelos empíricos de perda de propagação SUI, ECC-33 e o UFPA com as medições coletadas. Com o intuito de minimizar o erro entre os modelos e os valores do sinal medido, será realizada otimização dos modelos para verificar qual melhor se comporta no planejamento da rede 4G do ambiente estudado.

A otimização dos modelos é baseada no uso dos algoritmos genéticos, um método estocástico baseado na teoria da evolução e seleção natural de *Darwin*.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se:

- Realizar campanhas de medições de sinal LTE na cidade de Belém – PA com ajuda de *smartphone*.
- Comparação dos modelos existentes na literatura com o sinal medido na faixa de 2,6 GHz.
- Metodologia eficiente de ajuste do modelo de propagação buscando um melhor desempenho através da técnica de Algoritmo Genético.
- Identificar o modelo que melhor se adequa às características do ambiente e do sinal propagado.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos cuja organização é mostrada a seguir:

- No capítulo 2, serão revisados os conceitos sobre propagação de ondas de rádio
- No capítulo 3, haverá uma abordagem acerca de modelos de propagação com citações de modelos conhecidos na literatura.
- No capítulo 4, será caracterizada a técnica de otimização dos modelos através do Algoritmo Genético.
- No capítulo 5, será descrita a metodologia utilizada para a aquisição de dados e *setup* de medição.
- No capítulo 6, serão apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia empregada, havendo também uma análise comparativa com os modelos descritos na literatura e os modelos otimizados com algoritmo genético, em relação ao desempenho na predição de perdas de propagação, apontando o melhor modelo adaptado.

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO CANAL DE RÁDIO PROPAGAÇÃO

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O canal de rádio propagação é um dos principais fatores que influenciam na propagação do sinal em redes de comunicação sem fio, proporcionando muitas vezes limitações ao sistema, que estão diretamente relacionados com a faixa de frequência utilizada. Dessa forma, o estudo do canal de rádio se torna de extrema importância, sendo uma das etapas mais complexas do projeto de um sistema de comunicações móveis.

Este capítulo apresenta a conceituação básica do canal de rádio-propagação, descrevendo os mecanismos e características pertinentes a cada região do espectro de radiofrequência, a fim de proporcionar o entendimento das influências sofridas pelo sinal ao longo do trajeto percorrido até o receptor.

2.2 - FAIXAS DE FREQUÊNCIAS DAS ONDAS DE RÁDIO

Os mecanismos de propagação utilizados para comunicações móveis via rádio variam em função das faixas de frequências utilizadas, as quais são classificadas de acordo com os comprimentos de onda adotados [1]. Esta recomendação foi estipulada pela União Internacional de Telecomunicações (ITU), que estabeleceu as seguintes faixas nominais de frequências, mostradas na tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Designação nominal das bandas de frequência

Banda	Faixa de Frequência Nominal
HF	3 – 30 MHz
VHF	30 – 300 MHz
UHF	300 – 1000 MHz
L	1 – 2 GHz
S	2 – 4 GHz
C	4 – 8 GHz

X	8 – 12 GHz
Ku	12 – 18 GHz
K	18 – 27 GHz
Ka	27 – 40 GHz
R	26.5 – 40 GHz
Q	33 – 50 GHz
V	40 – 75 GHz
W	75 – 110 GHz

2.3 – MECANISMOS E EFEITOS DE PROPAGAÇÃO

O valor médio do sinal no receptor varia de acordo com a atenuação imposta pelo canal de propagação, que irá depender das características do ambiente encontrado entre o transmissor e o receptor, podendo variar de acordo com a arborização, tipos de relevos, estruturas arquitetônicas e dos fenômenos de propagação que as ondas eletromagnéticas possam ser submetidas. O entendimento desses mecanismos se torna fundamental para o cálculo do raio máximo que uma célula pode alcançar.

Em todo o planejamento de uma rede sem fio, é necessário estudar o trajeto percorrido por uma onda entre um transmissor e um receptor, observando os diversos fenômenos que a mesma estará sujeita devido a natureza dos mecanismos de propagação. Dentre os fenômenos que influenciam no canal de radio propagação, os principais são: reflexão, refração, difração, espalhamento e multipercurso [2].

2.3.1 - Reflexão

Este importante mecanismo de propagação em redes sem fio ocorre quando a onda eletromagnética incide na superfície entre dois meios, parte da energia é refletida e a outra parte é transmitida, penetrando no segundo meio, onde as parcelas correspondentes de energia são calculadas através dos coeficientes de reflexão e transmissão [3]. Esses coeficientes irão depender diretamente das propriedades elétricas de cada meio, tais como a permissividade,

permeabilidade magnética e condutividade, além da polarização da onda, da frequência utilizada e do ângulo de incidência da onda sobre a superfície, a qual deve ter dimensões bem maiores do que o comprimento de onda. Esse fenômeno é mais bem detalhado na figura 2.1.

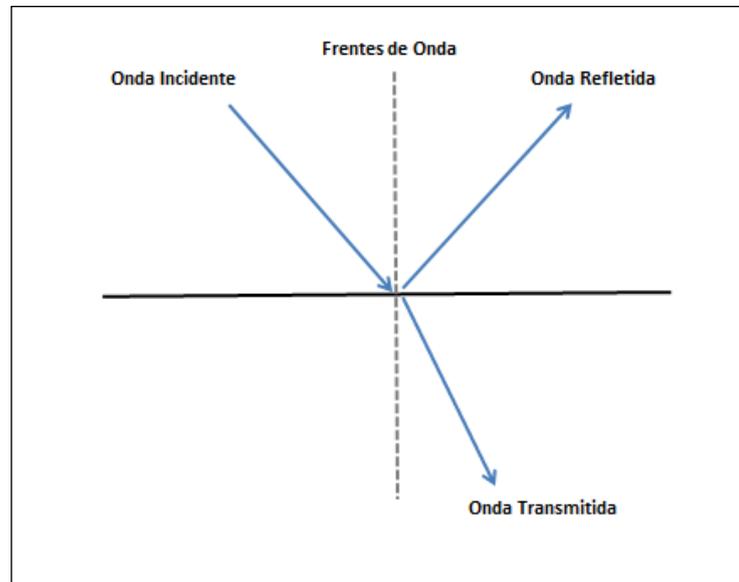


Figura 2.1 – Exemplo de reflexão para uma onda de rádio

2.3.2 - Difração

A difração é um fenômeno que ocorre quando um obstáculo não permite que o sinal seja propagado na sua totalidade, atenuando o sinal no equipamento receptor. Segundo o princípio de Huygens [4], todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados como fontes que produzirão ondas secundárias, as quais combinadas resultarão em frentes de ondas secundárias que contornarão o obstáculo, permitindo assim, que usuário sem linha de visada possa se comunicar, como mostra a figura 2.2.

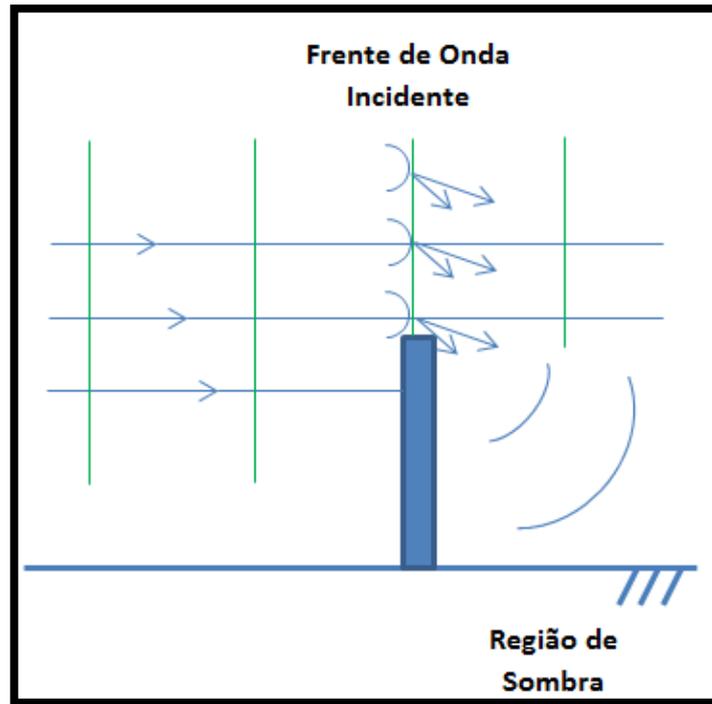


Figura 2.2 – Princípio de Huygens

2.3.3 – Refração

O fenômeno da refração ocorre quando uma onda eletromagnética atravessa meios de propagação com índices de refração diferentes, alterando assim a velocidade e a direção de propagação da onda. A figura 2.3 exemplifica bem esse mecanismo.

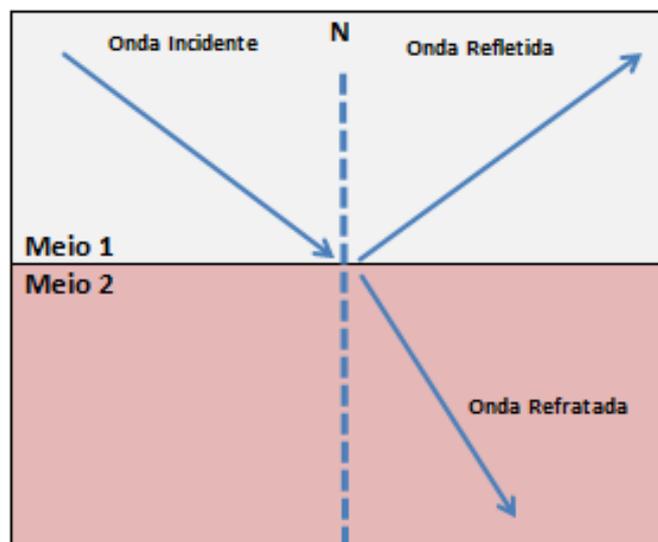


Figura 2.3 – Fenômeno da refração

2.3.4 – Espalhamento

O espalhamento ou difusão, como também é chamado, é um fenômeno que ocorre quando o meio onde se propaga o sinal apresenta um obstáculo com dimensões iguais ou inferiores ao comprimento de onda. O espalhamento ocorre em várias direções, podendo ser causado por pequenas irregularidades no percurso do sinal [3]. O espalhamento do sinal pode ser observado na figura 2.4.

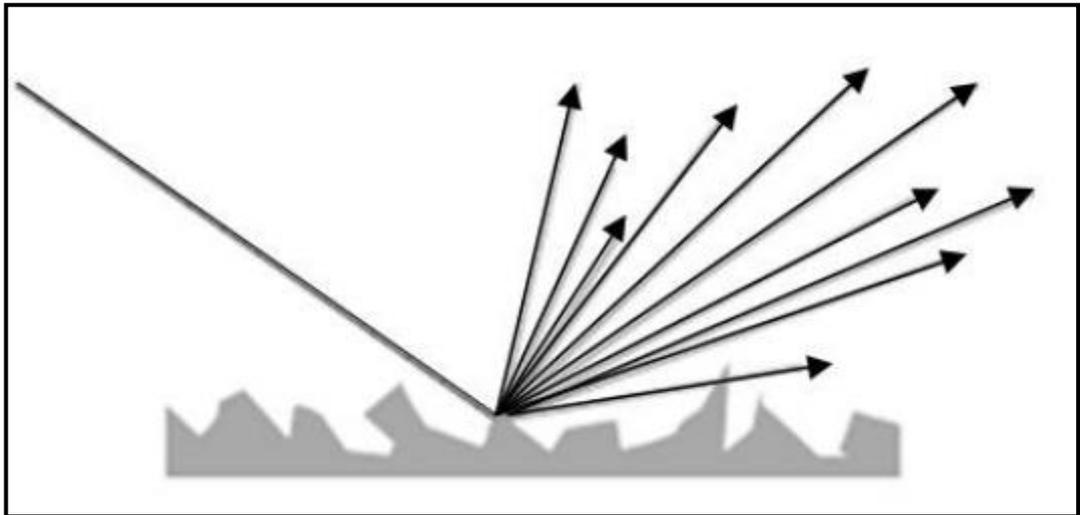


Figura 2.4 – Espalhamento do sinal

2.3.5 – Multipercurso

O multipercurso é um mecanismo resultante da ocorrência dos fenômenos da reflexão, difração e o espalhamento das ondas de rádio causadas por obstruções ao longo do percurso de propagação. Os efeitos desse fenômeno estão diretamente ligados à área total da obstrução, o qual gera sinais espúrios que percorrem um trajeto maior que o sinal original.

2.4 – PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

Esse mecanismo é caracterizado na situação em que o transmissor e receptor estão imersos em um espaço livre de obstruções e/ou reflexões em qualquer direção, onde o percurso experimentado pelo sinal propagado, entre transmissor e receptor, é caracterizado por uma linha de visada. Apesar de o termo espaço livre indicar propagação no vácuo, o seu entendimento se aplica também a diferentes ambientes e para diferentes sistemas como, por exemplo, as comunicações móveis.

Nos projetos de redes sem fio, a atenuação do sinal de rádio propagado pode ser determinada pela relação entre a potência recebida e a potência transmitida para se realizar uma estimativa inicial de cobertura do sinal propagado. Logo, para se obter a potência recebida, é utilizado o modelo de propagação descrito pela fórmula de transmissão de Friis ou equação de telecomunicações [2]:

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

Onde:

$P_R(d)$ - Potência recebida em função da distância d , em Watts

P_T - Potência de transmissão, em Watts

G_T e G_R - Ganhos de transmissão e recepção, em dB

λ - Comprimento de onda, em metros

d - Distância entre transmissor e receptor, em metros

L - Fator de perdas, $L \geq 1$

A perda no espaço livre ou a atenuação percebida pelo sinal propagado é encontrado pela razão entre a potência transmitida e a potência recebida, conforme observado em [5]:

$$L = \frac{P_T}{P_R} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.2)$$

Para a utilização em projetos de cobertura, a equação 2.2 é muitas vezes reescrita para representar a atenuação de percurso, relacionada à potência transmitida com a recebida em escala logarítmica. Isso é possível através de manipulação algébrica simples, a qual pode expressar a frequência tanto em Megahertz, conforme a equação 2.3 ou em Gigahertz, descrito na equação 2.4, além da atenuação, os ganhos das antenas e a distância entre transmissor e receptor em quilômetro, é expresso em decibel (dB):

$$L = 32,44 - 10 \log(G_T) - 10 \log(G_R) + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad \text{dB} \quad (2.3)$$

$$L = 92,44 + 20 \log(f) + 20 \log(d) - G_T - G_R \quad \text{dB} \quad (2.4)$$

Nos casos estudados neste trabalho, o operador logaritmo da equação 2.3 e 2.4 terá a referencia para log na base 10.

2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi caracterizado o canal de radio propagação, descritos os principais fenômenos que ocorrem na propagação da onda, entre transmissor e receptor, gerando perdas ao sinal propagado. Além disso, foram mostrados mecanismos de propagação ponto-a-ponto, que são utilizados como referencia para interpretação dos modelos ponto-área nos sistemas de comunicações móveis.

CAPÍTULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planejamento de sistemas de comunicação baseados em redes banda larga sem fio requer uma metodologia de projeto semelhante à utilizada em sistemas celulares, baseada na necessidade de se estimar o raio de cobertura em uma célula através das características do servidor (transmissor), do cliente (receptor) e do ambiente (percurso). Para estas situações, a predição da área de cobertura é feita através de modelos matemáticos que descrevem a atenuação do sinal (perda de percurso) para uma determinada distância de separação entre o transmissor e receptor. Esses modelos matemáticos são chamados de Modelos de Propagação.

3.2 - IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Modelos de propagação realizam a predição de perdas com base na utilização de diversos parâmetros relacionados ao ambiente onde o sinal se propaga. Podem ser levados em conta, por exemplo, a presença de árvores, prédios, e outros obstáculos considerados candidatos potencialmente influentes na atenuação do sinal em uma determinada faixa de frequência. Apesar de serem encontradas na literatura diversas classificações para a variedade de modelos de propagação existentes, os mesmos podem ser divididos em dois grandes grupos: Modelos Determinísticos e Empíricos [1].

3.2.1 - Modelos Determinísticos

Modelos de propagação teóricos, como o próprio nome indica, são modelos baseados em formulações teóricas, fundamentadas em suposições originadas de dados coletados em medições, ou, em leis físicas. Alguns tipos de modelos teóricos não se tornam viáveis para o planejamento de redes sem fio por não levarem em consideração as características específicas do ambiente em estudo. Outros tipos de modelos se baseiam na aquisição de bases de dados que descrevem detalhadamente as características do meio e na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas, como é o caso da técnica *Ray-Tracing* [6]. Porém, isto não é tão vantajoso, em nível de projeto, tendo em vista que os modelos que descrevem detalhadamente as

características de propagação do meio exigem grande esforço computacional e representam apenas as características de propagação de um local específico.

3.2.2 - Modelos Empíricos

Modelos de propagação empíricos são baseados na realização de diversas medições e observações em ambientes reais de propagação. A equação que rege um modelo empírico é criada de tal maneira para se ajustar da melhor forma possível aos dados medidos. Para que um modelo empírico possa representar com eficiência as perdas de propagação em um determinado ambiente, o mesmo deve ter seus parâmetros derivados de características do local estudado, vinculados com a frequência de operação do sistema e alturas efetivas das antenas utilizadas para transmissão e recepção de sinais [7]. A seguir, serão abordados alguns dos mais conhecidos modelos existentes na literatura, sendo que, alguns farão parte de uma análise de desempenho comparativa em relação ao modelo gerado neste trabalho.

3.2.2.1 - Modelo Okumura-Hata

O modelo Okumura-Hata é muito conhecido e utilizado em planejamentos de redes celulares, sendo umas das principais referências para projetos nesta área. Esse modelo foi gerado a partir de gráficos com informações de perdas de percurso obtidos por Okumura em diversas medições na cidade de Tóquio, nas faixas entre 150 MHz e 1500 MHz. Esse modelo é valido para estações base (transmissor) com alturas efetivas entre 30 m e 200 m e para alturas de cliente (receptor) entre 1m e 10 m.

A perda de propagação, em dB, para áreas urbanas é expressa pela equação 3.1:

$$L_u = 69,55 + 26,26 \log(f) + 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + [44,9 - 6,55 \log(h_{te})] \log(d) \quad (3.1)$$

Onde:

f - Frequência de operação, em MHz

h_{te} - Altura do transmissor, em metros

h_{re} - Altura de recepção, em metros

$a(h_{re})$ - Fator de correção para altura da antena em função do tipo de área, em dB

De acordo com os ajustes feitos por Hata, este modelo pode ser aplicado para áreas urbanas e rurais utilizando as variações do termo $a(h_{re})$ e os ajustes mostrados nas equações (3.2), (3.3) e (3.4):

Cidades pequenas e médias

$$a(h_{t\theta}) = [1,1 \log(f) - 0,7]h_{t\theta} - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad (3.2)$$

Cidades Grandes

$$a(h_{r\theta}) = 8,29[\log(1,54h_{r\theta})]^2 - 1,1, f < 300\text{MHz} \quad (3.3)$$

$$a(h_{r\theta}) = 3,2[\log(11,75h_{r\theta})]^2 - 4,97, f \geq 300\text{Mz} \quad (3.4)$$

Para se calcular a perda total de percurso em uma área suburbana usa-se a seguinte equação:

$$L = L_u - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (3.5)$$

A perda total para áreas rurais é encontrada utilizando-se a equação 3.6:

$$L = L_u - 4,78[\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (3.6)$$

3.2.2.2 - Modelo ECC – 33

O modelo ECC- 33 é baseado na extrapolação de medidas realizadas por Okumura em Tóquio, na qual foi utilizada a classificação de cidades de grande e médio porte, com fatores

de correção para áreas suburbanas ou abertas, de modo que modelo seja aplicável a faixa de 3,4 a 3,8 GHz [8]. A equação que representa a perda do modelo é dada pela expressão 3.7:

$$L_{ECC} = Af_s + A_{bm} - G_b - G_r \quad (3.7)$$

$$Af_s = 92,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3.8)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,83 \log(d) + 7,984 \log(f) + 9,56[\log(f)]^2 \quad (3.9)$$

$$G_b = \log\left(\frac{h_t}{200}\right) \{X_1 + X_2[\log(d)]^2\} \quad (3.10)$$

O fator de ganho para cidades de pequeno porte:

$$G_r = [42,57 + 13,7 \log(f)][\log(h_r) - 0,585] \quad (3.11)$$

E para cidades de grande porte:

$$G_r = X_3(h_r) - X_4 \quad (3.12)$$

Onde os valores das constantes de X_1 , X_2 , X_3 e X_4 são fixos e representados por:

$$X_1 = 13,958$$

$$X_2 = 5,8$$

$$X_3 = 0,795$$

$$X_4 = 1,862$$

3.2.2.3 - Modelo IEEE 802.16 (Modelo SUI)

O grupo de trabalho 802.16 do IEEE vem desenvolvendo padrões em sistemas de banda larga. Para os padrões operantes em frequências abaixo de 11 GHz, este grupo de trabalho criou modelos de canal, conhecidos também como Modelos SUI (*Stanford University Interim*), pelo fato de haver a participação da Universidade de Stanford em seu desenvolvimento [9]. A perda de propagação para ambientes suburbanos é calculada pelas seguintes equações e valores tabelados [10], mostrados a seguir:

$$L_{SUI} = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S, \quad d > d_0 \quad (3.13)$$

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.14)$$

$$\gamma = \frac{a - bh_b + c}{h_b} \quad (3.15)$$

Onde:

d - Distância, em metros

d_0 - Distância inicial, $d_0 = 100$ metros

λ - Comprimento de onda, em metros

γ - Expoente de perdas

h_b - Altura da estação base, $10 \leq h_b \leq 80$ metros

Os parâmetros a , b e c assumem valores que variam de acordo com o tipo de terreno [11], de acordo com a tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Parâmetros relacionados aos tipos de terreno

Parâmetro do Modelo	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

O terreno tipo A é caracterizado pela máxima perda de percurso, tendo em vista que se trata de regiões de relevo bastante acidentado com densidade moderada a intensa de vegetação. Já o terreno tipo C é caracterizado por regiões de perda de percurso mínima, onde o terreno é mais plano, e possui uma densidade de vegetação leve. O tipo B, pode ser classificado como um terreno intermediário entre o terreno tipo A e o terreno tipo B.

A variável S na equação (3.13) caracteriza o desvanecimento lento do sinal (*shadowing*). Normalmente os valores do desvio padrão de S estão entre 8,2 e 10,6 dB, dependendo da morfologia do terreno ou vegetação [11].

O modelo apresentado tem validade para frequências próximas de 2 GHz e alturas de recepção até 2 m. Para se utilizar o modelo descrito em outras frequências e alturas de recepção entre 2 m e 10 m, é necessário usar a equação do modelo de propagação acrescido de fatores de correção:

$$L = L_{SUI} + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (3.16)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log(f/2000) \quad (3.17)$$

$$\Delta PL_h = -10,8 \log(h/2) , \text{ terrenos A e B} \quad (3.18)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log(h/2) , \text{ terreno C} \quad (3.19)$$

Onde:

ΔPL_f - Fator de correção de frequência, em dB

ΔPL_h - Fator de correção para altura de recepção, em dB

h - Altura de recepção, em metros

3.2.2.4 - Modelo UFPA

O modelo UFPA elaborado tem como referência o trabalho apresentado em [12]. A elaboração deste novo modelo é obter uma melhor predição das perdas de propagação em ambientes muito similares aos apresentados em [12]. A proposta do modelo UFPA foi desenvolvida com as devidas alterações e, é baseada na equação 3.20 expressa pela perda L_{MP} [13]:

$$L_{MP} = K_1 \log(d) + K_2 \log(f) + K_0 \quad (3.20)$$

Onde:

K_1 e K_2 - Ajustes obtidos com mínimos quadrados lineares

d - Distância, metros

f - Frequência, MHz

K_0 - Fator de correção

O fator de correção K_0 relaciona as alturas de transmissão, recepção e obstrução (construções e vegetações) sendo também, uma função do comprimento de onda. O fator K_0 é determinado pelo seguinte polinômio de primeira ordem [1]:

$$K_0 = a - bX \quad (3.21)$$

Onde:

a e b - Parâmetros ajustados por mínimos quadrados lineares

X - Variável do polinômio

A equação 3.22 obtida empiricamente [1] define a variável X do polinômio.

$$X = \frac{(H_T + H_R)\lambda}{0.1H_{OB}} \quad (3.22)$$

Onde:

H_T - Altura da Estação base, em metros

H_R - Altura do rádio cliente, em metros

λ - Comprimento de onda, em metros

H_{OB} - Altura média das obstruções, em metros

3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas e mostradas as classificações dos modelos de propagação presentes na literatura, onde tem-se como foco os modelos SUI, ECC-33 e o UFPA, que serão utilizados durante a análise comparativa com a perda de propagação do sinal medido.

CAPÍTULO 4 – ALGORÍTMO GENÉTICO

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será abordado o método de otimização denominado algoritmo genético, o qual tem como finalidade a busca pela melhor solução para um dado problema, através de um conjunto de procedimentos, a fim de maximizar ou minimizar uma função, dependendo do objetivo configurado. É neste contexto que se insere o algoritmo genético, que é um método de otimização probabilístico e de busca, baseado no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, proposto por *John H. Holland* em meados de 1970 [14].

4.2 – HISTÓRICO DO ALGORÍTMO GENÉTICO A PARTIR DAS TEORIAS EVOLUTIVAS

Em 1809, a teoria da evolução das espécies predominantemente aceita pelo mundo acadêmico, era a ideia do naturalista francês *Jean Baptiste Pierre Antonie de Monet*, também conhecido como Lamarck. Para ele, as características adquiridas pelos animais, são transmitidas hereditariamente, surgindo assim a ideia da “lei do uso e desuso”. Porém, em 1859 o filósofo e também naturalista *Charles Darwin* lançou seu livro com título “A origem da Vida”, o qual confrontava a teoria de *Lamarck* apresentando uma explicação científica de como as espécies evoluem [15]. *Darwin* propôs essa teoria após uma longa viagem a bordo do navio HMS *Beagle*, passando por diversos lugares, onde o naturalista pode observar *in loco* várias espécies de animais, e verificou que alguns animais da mesma espécie apresentavam ligeira diferença de seus parentes vivendo em outros ecossistemas, diferenças estas que colaboravam na melhor adaptação das espécies em cada ecossistema. Para *Charles Darwin* a evolução era uma combinação entre seleção natural e conceitos genéticos.

A seleção Natural, teoria mais aceita pela comunidade acadêmica, é o processo de evolução que apresenta a melhor explicação para a adaptação, onde o meio é responsável por selecionar os seres mais aptos, logo, as heranças genéticas dos mais aptos serão passadas de geração a geração. Já a genética está relacionada à diversidade entre os indivíduos de uma

população, onde a diversidade está ligada a combinação e inserção e/ou alteração de material genético do indivíduo.

Foi em meados do século passado, por volta dos anos 1960, que o cientista estadunidense *John H. Holland* encontrou na teoria da evolução de *Darwin* uma forma de desenvolver uma ferramenta que pudesse otimizar sistemas e encontrar resultados ótimos, em curto espaço de tempo, introduzindo assim as bases para o algoritmo genético. Então, em 1975 seu trabalho e estudos foram publicados no livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [16]. Porém, foi através dos trabalhos realizados por seu discípulo *David E. Goldberg*, que o algoritmo genético passou a ser popularizado. Em 1989, *Goldberg* descreveu com maiores detalhes a metodologia e funcionamento do algoritmo genético no livro *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* [17], mostrando à comunidade acadêmica o algoritmo genético como uma excelente técnica de busca e na otimização de problemas nas mais diversas áreas.

4.3 – CONCEITOS E TERMINOLOGIAS DE ALGORÍTMO GENÉTICO

Como já mencionado, o algoritmo genético é um método computacional de busca e otimização baseado em mecanismos de evolução natural e da genética. Por isso, ele faz uso de metáfora biológica para manter o paralelo com a genética e a ciência evolutiva biológica, usando assim, terminologias semelhantes ao da biologia para representar seus conceitos e estruturas de dados, porém nem sempre apresentam o mesmo significado [19]. Os principais termos são listados abaixo:

- **Gene** → São variáveis de otimização que representam a menor unidade utilizada dentro do código do algoritmo genético para declarar algum parâmetro ou característica importante que possa afetar a solução do problema de otimização. Ele é geralmente representado por números reais, inteiros, bits ou mesmo conjuntos de caracteres.

- **Cromossomo** → Seguindo os conceitos da biologia, o cromossomo é formado por um conjunto de genes, assim também é no algoritmo genético, onde o cromossomo se apresenta com um conjunto ordenado de genes que caracterizam um único indivíduo, podendo ser uma possível solução ao problema.
- **Indivíduo** → É o conjunto de um ou mais cromossomos, o qual representa soluções encontradas para o problema a ser otimizado. A combinação entre cromossomos pode ocorrer para solucionar problemas mais complexos, constituindo em um único indivíduo.
- **População** → No algoritmo genético, a população se configura como o conjunto de indivíduos criados aleatoriamente, utilizados como base para o processo de busca, sendo possíveis candidatos para soluções ao problema de otimização.
- **Geração** → É uma população estabelecida por um tempo determinado, onde tem-se uma geração atual, formadas por pais, que são indivíduos da população atual escolhidos no processo de *crossover*, que irão gerar os filhos, que serão os indivíduos da próxima geração, gerados pelo processo de *crossover*.

4.4 – ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO ALGORÍTMO GENÉTICO (AG)

Por o AG ser um muito versátil, ele é capaz de ser aplicado a uma variedade muito grande de problemas a serem otimizados. O algoritmo genético não possui um modelo único para representar suas etapas de execução, já que ele pode ser utilizado nas mais diversas áreas, assim como, utilizado nas mais variadas soluções. Porém, todos os AG apresentam uma sequência semelhante.

Para melhor visualizar a estrutura do AG, é apresentado um diagrama de fluxo mostrando alguns de suas etapas na Figura 4.1 [20].

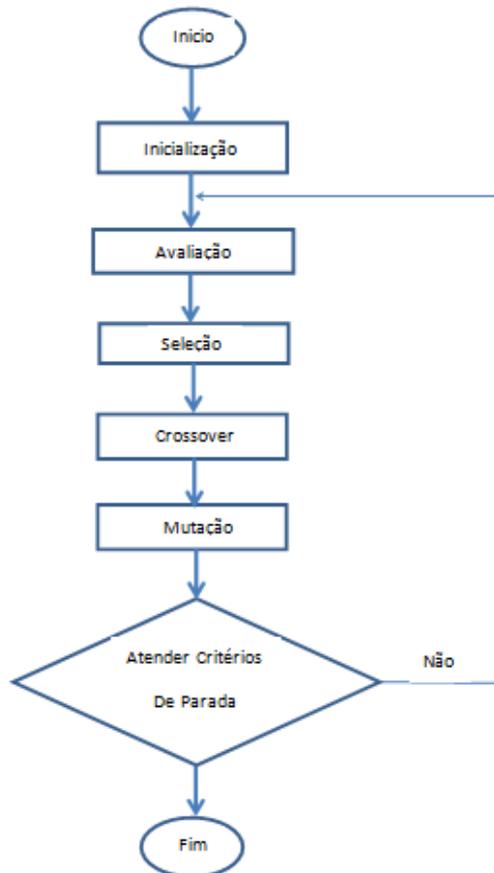


Figura 4.1 – Fluxograma com etapas de um Algoritmo Genético.

Algoritmo genético é iniciado através de um conjunto de soluções ou parâmetros a serem otimizados (cromossomos) denominados de população, onde os cromossomos dessa população são gerados de forma aleatórias através dos genes, conforme já mencionado. Para cada cromossomo, é calculado um valor de *fitness* (valor numérico atribuído a cada indivíduo da população), que posteriormente é avaliado e comparado se o valor atual do *fitness* para o cromossomo é o ideal (solução do problema) ou serão necessárias novas interações entre os indivíduos, trocando assim códigos genéticos para se obter um valor de *fitness* melhor, selecionado assim os melhores cromossomos. Essa seleção é baseada no princípio da sobrevivência do mais forte, a qual se fundamenta no conceito de "seleção natural" de *Darwin*. Na etapa seguinte, considerada a operação mais importante dentro do algoritmo

genético, ocorre o cruzamento (*crossover*) entre os genes de diferentes cromossomos, realizando a recombinação de sequências de bits, criando assim, novos pares de cromossomos. Caso seja percebido que genes úteis não foram gerados no passo inicial, é possível solucionar essa falha através da técnica de mutação que consiste em gerar um novo valor para a posição de *crossover* e depois realizar a modificação do valor do gene de forma aleatória. As etapas de avaliação e de mutação são repetidas até que se tenha obtido o valor ótimo para a solução do problema ou alcançado o número máximo de gerações predefinido.

Nas seções seguintes, serão mostradas de forma mais detalhada os métodos utilizados em cada processo realizado pelos AG, para que se tenha uma melhor compreensão sobre o mecanismo de otimização [21].

4.4.1 – Inicialização

Nesta etapa, a população inicial de indivíduos é gerada aleatoriamente ou através de algum processo heurístico, a partir do problema a ser solucionado. Sendo importante que esta população inicial seja grande o suficiente para atender a maior parte possível do espaço de busca, possibilitando que haja uma diversidade genética significativa [22], permitindo assim, que o AG possa explorar soluções paralelas de uma só vez.

4.4.2 – Avaliação

A etapa de avaliação ou reprodução, como também é conhecida, consiste em avaliar os indivíduos existentes em cada população, verificando a aptidão de cada um deles na resolução do problema apresentado. Para realizar a avaliação, é utilizada uma função *fitness*, a qual calcula valores numéricos para cada cromossomo, informando assim o quão apto este indivíduo se encontra para a solução do problema [23]. Por isso, deve-se escolher muito bem a função *fitness* que será utilizada no AG a fim de se obter o melhor resultado esperado no menor espaço de tempo.

4.4.3 – Operadores Genéticos

Os operadores genéticos têm como premissa transformar a população, através de sucessivas gerações, na tentativa de melhorar a aptidão de cada indivíduo, realizando buscas até que se encontre o melhor resultado. Os operadores genéticos são métodos probabilísticos utilizados para que a população possa se diversificar e manter as características de adaptação adquiridas por gerações anteriores. Existem vários tipos de operadores utilizados pelos AG na tentativa de solucionar específicos problemas, sendo a seleção, o *crossover* e a mutação os mais discutidos na literatura.

4.4.3.1 – Seleção

Como o próprio nome sugere, a etapa de seleção é responsável em desempenhar a função de seleção natural do indivíduo mais apto da população, o qual irá sobreviver e reproduzir, criando uma nova população mais adaptada para a próxima geração. O processo de seleção segue o mesmo raciocínio da teoria da evolução de Darwin, onde os indivíduos mais fortes e/ou aptos irão sobreviver e se reproduzirem, passando aos seus descendentes suas heranças genéticas. Esta seleção é feita de forma aleatória de indivíduos da população a partir do valor de *fitness* de cada um, sendo que, quanto melhor for o valor de *fitness* do indivíduo, mais chances ele terá de ser selecionado para a próxima geração [24]. Porém, é importante notar que os indivíduos com níveis mais baixos de adaptação não poderão ser descartados na sua totalidade, irão possuir apenas uma probabilidade menor de serem selecionados. Existem várias técnicas de seleção empregadas hoje pelo algoritmo genético, dentre as mais importantes pode-se citar a de torneio, a de roleta, a elitista e a de *ranking*.

4.4.3.1.1 – Método de Torneio

A seleção por torneio é um método utilizado principalmente por sua eficiência e sua implementação. O método consiste em escolher de forma aleatória vários indivíduos de uma população, preservando a diversidade genética, fazendo com que estes indivíduos entrem em competição pelo direito de participar dos operadores genéticos. Os indivíduos da população escolhidos para competir são avaliados a partir de um parâmetro denominado tamanho do torneio (k) [23], onde ele irá definir quantos indivíduos serão selecionados de forma aleatória dentro da população para competir, uma vez estabelecidos os competidores do torneio, aquele

que possuir a melhor aptidão, ou seja, aquele com valor de *fitness* maior será selecionado. A principal vantagem apresentada neste método é que os indivíduos que irão competir são selecionados aleatoriamente, não existindo assim qualquer favorecimento para os indivíduos com maior aptidão.

4.4.3.1.2 – Método da Roleta

O método da roleta é o mais praticado dentre os tipos de seleções existentes no AG. Esta técnica consiste em atribuir a cada indivíduo uma probabilidade de passar para a próxima geração, esta probabilidade está diretamente relacionada com a função *fitness* contida em cada indivíduo, logo, ela será proporcional a adaptação do mesmo a um dado ambiente, decidindo assim se o indivíduo morre ou irá sobreviver para produzir novos descendentes [25]. Por isso o nome de método da roleta, pois cada indivíduo é considerado uma “fatia” da roleta, onde o tamanho de cada “fatia” irá depender da probabilidade de adaptação de cada indivíduo.

4.4.3.1.3 – Método Elitista

Este método, que pode ser utilizado em conjunto com os demais métodos de seleção, é utilizado com a finalidade de não descartar indivíduos com alto grau de adaptação, privilegiando apenas os indivíduos com melhor adaptação para as próximas gerações. Logo, esta técnica permite que indivíduos com boas avaliações sejam reintroduzidos nas próximas gerações, evitando assim que ocorram perdas de informações importantes presentes em indivíduos com alto grau de aptidão, garantindo assim, que seu material genético faça parte do processo na próxima geração [26].

4.4.3.1.4 – Método de *Ranking*

Este método é utilizado com a finalidade de evitar convergências prematuras, assim como a predominância de um indivíduo superior dentro do algoritmo genético. Nesta seleção, os indivíduos são classificados em forma de *ranking*, o qual será ordenado dependendo da função *fitness* atribuída a cada indivíduo. O *ranking* é utilizado então no momento da seleção,

ao invés de usar somente o valor de *fitness* [25]. Esta técnica apresenta como desvantagem o tempo necessário ao processamento do algoritmo a cada geração, a fim de ordenar os indivíduos de acordo com a função de *fitness*.

4.4.3.2 – *Crossover*

A próxima etapa é o cruzamento, que é responsável em realizar as trocas de genes na combinação das características genéticas dos pais durante a reprodução, fazendo com que tais características sejam herdadas pelas próximas gerações através de seus filhos. Então, após a etapa da seleção dos indivíduos mais aptos ocorrer, eles serão submetidos ao processo de *crossover*, o qual irá manipular o material genético existente na população, além de permitir a criação de novos indivíduos a partir dos indivíduos já selecionados na geração anterior. Existem algumas formas de *crossover*, as que mais se destacam são: Cruzamento uniforme, cruzamento de um ponto e cruzamento de dois pontos. Cada uma dessas técnicas de *crossover* apresentam características importantes que irá depender do tipo de ambientes e dos parâmetros utilizados no AG [27].

4.4.3.2.1 – *Crossover Uniforme*

Este tipo de cruzamento consiste no emparelhamento de dois indivíduos, o PAI₁ e o PAI₂, onde os genes de cada um serão copiados aleatoriamente e utilizados na criação de outros dois novos indivíduos, chamados de FILHO₁ e FILHO₂, que irá fazer parte da próxima geração. Por exemplo, um vetor de bit formado de 0's e 1's é criado para servir de guia entre a troca do material genético entre os pais e os filhos. Supondo que o valor que ocorra seja igual um, o primeiro filho irá herdar as características genéticas do primeiro pai e o segundo filho irá herdar as características genéticas do segundo pai, porém, se ocorrer o valor 0, o primeiro filho irá ter material genético do segundo pai e o segundo filho terá material genético do primeiro pai, dependendo somente da forma que foi configurado o vetor bit para esse cruzamento [28]. A figura 4.2 mostra com mais detalhes o processo de *crossover* uniforme.

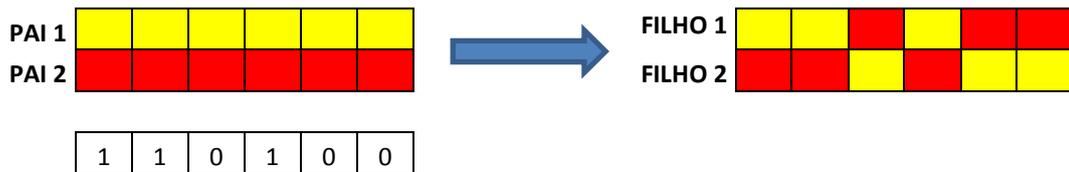


Figura 4.2 – Método de crossover uniforme.

4.4.3.2.2 – *Crossover* de um ponto

O método de *crossover* de um ponto, consiste em definir aleatoriamente um ponto de corte entre os genes dos indivíduos, neste caso o PAI₁ e o PAI₂, onde cada pai irá dividir seu material genético em outras duas partes para que seja realizado a criação dos novos indivíduos da geração seguinte. Por exemplo, após ser estipulado o ponto de corte, dividindo o material genético de cada pai, é então combinado a primeira parte do material genético do primeiro pai com a segunda parte do material genético do segundo pai, dando origem ao FILHO₁. O mesmo raciocínio é usado na criação no FILHO₂, onde a segunda parte do material genético do primeiro pai é combinado com a primeira parte do material genético do segundo pai [28]. Este exemplo é melhor visualizado na figura 4.3.

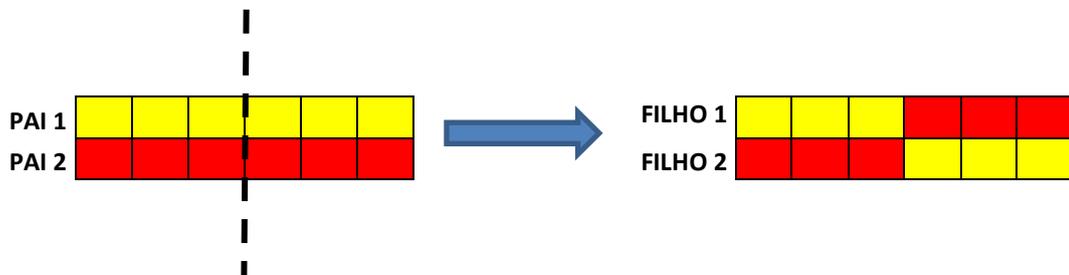


Figura 4.3 – Método de crossover de um ponto.

4.4.3.2.2 – *Crossover* de dois pontos

Pode-se dizer que este método é um *upgrade* do *crossover* de um ponto só. A lógica utilizada neste método é a mesma utilizada no método de *crossover* de um ponto, o que muda

nesta versão é a quantidade de cortes realizados nos indivíduos da população. Como o próprio nome sugere, no método de *crossover*, os indivíduos selecionados, PAI₁ e o PAI₂, são cortados agora em dois pontos, dividindo seu material genético em três partes, possibilitando assim filhos com uma diversidade genética maior para as próximas gerações [28]. Esse processo é mostrado na figura 4.4.

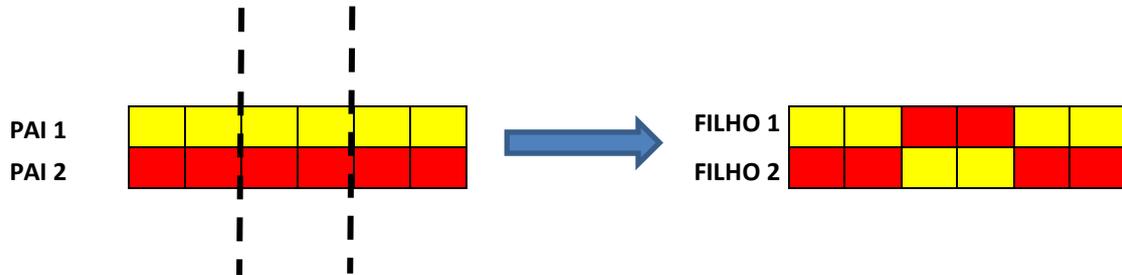


Figura 4.4 – Método de crossover de dois pontos.

4.4.3.3 – Mutação

A mutação no algoritmo genético é extremamente importante para garantir a diversidade genética da população dentro de uma geração. Essa operação é realizada alterando aleatoriamente os genes disponibilizados em cada filho, introduzindo assim, novas características à população resultante, de tal forma, que o algoritmo não fique paralisado em um mínimo local, tendo em vista que a mutação altera sutilmente a direção da busca. É importante ressaltar que nem todos os indivíduos irão passar pelo processo de mutação, o qual irá depender de uma taxa de probabilidade de mutação muito baixa, geralmente em torno de 0 e 0,1 [29].

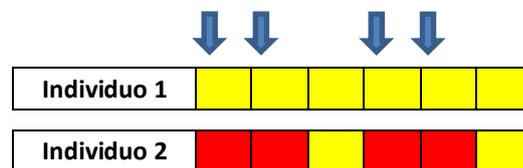


Figura 4.5 – Processo de mutação.

4.4.4 – Critérios de Parada

Os critérios de parada utilizados pelo AG irão depender do tipo de problema que se deseja otimizar. Esses critérios devem ser pré-estabelecidos obrigatoriamente para que não ocorra um laço infinito dentro do AG. Existem vários métodos de paradas que podem ser utilizados como critério, como é o caso do número máximo de gerações, logo, assim que o algoritmo genético atenda ao critério de parada, a busca é finalizada [30]. Outro método muito utilizado, também, é o de estabelecer um valor máximo de *fitness* para o AG, quando o algoritmo ultrapassa esse valor, o AG é finalizado.

4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi mostrado um breve histórico sobre o algoritmo genético, mostrando fatos e conceitos do universo biológico através da obra publicado por *Charles Darwin*. Foi apresentado de forma detalhada os principais mecanismos presentes no AG, assim como, os passos necessário para que o algoritmo possa chegar no seu objetivo final que é a solução do problema.

CAPÍTULO 5 – FUNDAMENTOS DA REDE LTE

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As demandas por taxas de transmissão de dados cada vez maiores se faz necessária, em parte, devido ao desenvolvimento de novos aplicativos que necessitam de bandas cada vez maiores. Neste cenário surge uma tecnologia de quarta geração, denominada *Long Term Evolution* (LTE), a fim de satisfazer essa crescente demanda.

Este capítulo irá abordar a estrutura e funcionamento da rede LTE, informando tanto os requisitos básicos necessários para a criação desse sistema, como o detalhamento de cada elemento pertencente a sua rede.

5.2 – HISTÓRICO DA REDE LTE

O setor das comunicações móveis vive em constantes transformações, quase sempre na tentativa de atender a crescente demanda por largura de banda. Isso se deve principalmente por dois fatores: o aumento da expectativa do cliente por serviços de boa qualidade oferecidos pela operadora e pela fabricação de equipamentos com capacidades de transmissão cada vez maiores.

O desenvolvimento e a evolução das redes de comunicações móveis vêm sendo padronizada desde 1995 pela organização 3GPP (3rd *Generation Partnership*), a qual elabora as especificações que cada tecnologia de rede de acesso deve conter. A evolução dessas redes é conferida pelo 3GPP através de *releases*.

A 3GPP estipulou em 2005, os requisitos e metas que a rede LTE (*release 8*) deve possuir. Após as recomendações serem elaboradas elas são disponibilizadas para empresas no setor de telecomunicações para o desenvolvimento da mesma [31]. Abaixo estão algumas das principais recomendações:

- Estabelecer uma rede para comutação de pacotes, não existindo mais o suporte a serviços de comutação por circuito;

- Proporcionar aumento de taxas de dados aos usuários;
- Minimizar a latência nos serviços de rede;
- Simplificar a arquitetura de rede;
- Aumentar a eficiência espectral do sistema.

Para atingir os requerimentos estipulados, foi necessário realizar uma grande mudança para o sistema LTE, tanto na interface de rádio como na arquitetura de rede do sistema [32]. Alguns dos requisitos do *release 8* em [37] é apresentado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Principais requisitos do *release 8*.

		Requisitos
Downlink	Máxima taxa de transmissão	100 Mbps
	Máxima eficiência espectral	5 bps/Hz
	Eficiência espectral	1,6 - 2,1 bps/Hs
Uplink	Máxima taxa de transmissão	50 Mbps
	Máxima eficiência espectral	2,5 bps/Hz
	Eficiência espectral	0,66 - 1,0 bps/Hz

5.3 – ARQUITETURA DA REDE LTE

Conforme mencionado anteriormente, o desenvolvimento do sistema LTE surgiu a fim de disponibilizar uma rede de acesso às operadoras de comunicações móveis, que fosse capaz de atender o aumento constante de tráfego de dados por parte dos usuários, assim como, propor equipamentos menos complexos e mais econômicos para as companhias de telecomunicações, preservando a interoperabilidade entre as diferentes versões dos equipamentos já implantados na rede.

A fim de corresponder às necessidades das operadoras de telecomunicações, a tecnologia LTE foi desenvolvida disponibilizando algumas melhorias como: Altas taxas de transmissão, tanto para *upload* quanto para *download*, eficiência espectral, sistema baseado totalmente em redes IP, maior nível de mobilidade e segurança [33]. Para que o sistema LTE pudesse proporcionar tais melhorias, foi necessário realizar grandes transformações, tanto na sua rede de acesso quanto no núcleo de rede.

Foi então criada uma nova estrutura para atender aos requerimentos do LTE, com uma rede de acesso denominada de E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), constituída apenas pelo terminal móvel e pela eNodeB (*Evolved NodeB*) e um núcleo de rede, denominado EPC (*Evolved Packet Core*), o qual apresenta uma reduzida quantidade de elementos, o que contribui diretamente para se atender a latência exigida para a tecnologia [34]. Esses dois elementos de rede juntos, formam o EPS (*Evolved Packet System*). Essa nova arquitetura é bem visualizada na Figura 5.1.

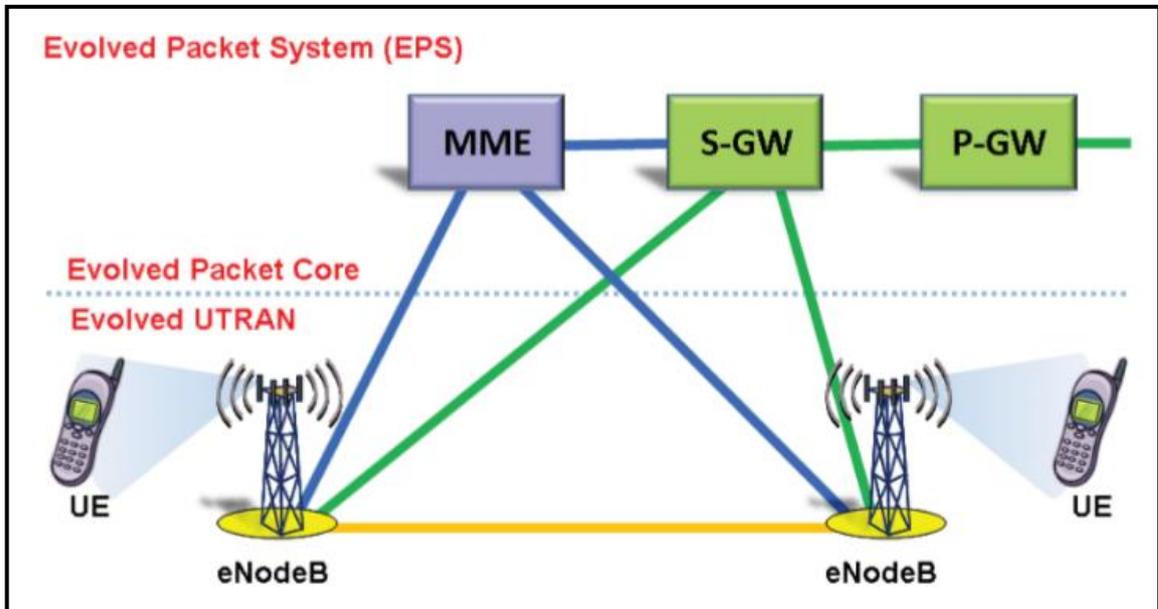


Figura 5.1 – Arquitetura de rede LTE

5.3.1 – Rede de Acesso E-UTRAN

Na rede de acesso rádio no sistema LTE, não se faz necessário a existência de um elemento para realizar a interface rádio com o terminal móvel e outro elemento funcionando como uma controladora, como era o caso das tecnologias passadas, 2G e 3G. O LTE possui apenas o componente de rede eNodeB, o qual é responsável em assumir tanto as funções realizadas anteriormente pela RNC (*Radio Network Controller*) como pela NodeB, realizando dessa forma a gestão dos recursos de rádio RRM (*Radio Resource Management*), do controle de recurso de rádio RRC (*Radio Resource Control*), assim como o controle de *link* de rádio RLC (*Radio Link Control*). Essa característica do LTE permite que a rede de acesso E-UTRAN apresente uma arquitetura mais compacta [35].

Logo, o eNodeB é responsável pela transmissão e recepção de rádio com o equipamento de radio do cliente, sendo que algumas de suas principais funcionalidades estão listadas abaixo:

- Controle de Admissão;
- Sinalização de controle;
- Coordenação de interferência *inter-cell*;
- Balanceamento de carga;
- Sincronismo;
- Mobilidade;
- *Paging*.

5.3.2 – Núcleo de rede EPC

O núcleo de rede no LTE, denominado EPC (*Evolved Packet Core*), foi projetado principalmente para fornecer serviço de conectividade IP por meio da arquitetura de rede otimizada, que permite explorar os novos recursos oferecidos acesso à rede eUTRAN, como as altas taxas de transmissão e prestar serviços em tempo real, permitindo uma melhor qualidade e desempenho aos usuários [36]. Além disso, outro fator importante considerado na concepção da arquitetura do núcleo de rede 4G é a capacidade de acessar seus serviços através de outras redes de acesso, tanto especificados pelo 3GPP (UTRAN e GERAN) como fora do âmbito do 3GPP (CDMA2000, WiMAX, 802.11). O EPC é constituído basicamente por 3 elementos de rede, o MME (*Mobility Management Entity*), o S-GW (*Serving-Gateway*) e o P-GW (*Packet Data Network Gateway*) [37].

5.3.2.1 – *Mobility Management Entity* (MME):

Este elemento é responsável em prover mobilidade ao usuário e pela sinalização, suportar *handover* entre diferentes eNodeBs dentro do sistema LTE, assim como, para outras tecnologias, além de estabelecer conexões dos usuários e a autenticação dos mesmos. O MME apresenta as mesmas características dos elementos MSC (*Mobile Switching Center*) e do VLR (*Visitor Location Register*) da rede UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [38]. As principais atividades executadas pelo MME seguem abaixo:

- Gerência de mobilidade do terminal móvel;
- Gerência o processo de *Location Update*;
- Realiza processos de *handover intra-LTE*;
- Autentica usuários através do HSS (*Home Subscriber Server*);
- Controle de *Roaming*.

5.3.2.2 – Serving Gateway (S-GW):

O elemento de núcleo de rede S-GW é responsável pelo encaminhamento de pacotes IP entre o equipamento do usuário e a internet, atuando como ponto final entre a rede de acesso E-UTRAN e o núcleo de rede EPC [38]. O *-serving gateway* atua também disponibilizando mobilidade local dos usuários através de *handovers* entre as eNodeBs do sistema LTE e *handovers* com outros sistemas, além de informar à rede o tráfego de dados dos usuários, dentre outras responsabilidades listadas abaixo:

- Gerenciar o roteamento de pacotes;
- Retransmitir pacotes de dados para o P-GW;
- Gerenciar conexões de *download*;
- Interceptação judicial.

5.3.2.3 – Packet Data Network Gateway (P-GW):

O P-GW é o roteador de borda do sistema LTE com a rede externa, desempenhando as mesmas tarefas que o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) do sistema UMTS [35]. Esse elemento é responsável pela interface entre a rede LTE e outras redes de pacotes de dados, como a *internet*.

- Implementa QoS (*Quality of Service*) para usuários no *download*;
- Estabelecer conectividade dos usuários com a rede externa;
- Tarifação para o tráfego de dados.

5.4 – A Camada MAC no LTE

A camada MAC (*Medium Access Control*), é responsável em receber os dados formatados das camadas superiores através dos canais lógicos e mapeá-los em canais de transportes. Possui também a responsabilidade em realizar a multiplexação e demultiplexação e entregá-los aos blocos de transportes, encaminhados então a camada física através dos canais de transporte.

5.4.1 – Canais Lógicos

No sistema LTE, os canais lógicos são definidos a partir do tipo de informação que o mesmo transporta, classificados como canais de controle ou canais de tráfego. Os canais de dados são usados na troca de informações de controle e configurações entre usuário e a rede LTE [39]. Já os canais de tráfego, como o próprio nome sugere, são usados na transmissão de dados do usuário.

5.4.2 – Canais de Transporte

Os canais de transporte no sistema LTE são responsáveis em realizar a interface entre os canais lógicos e a camada física. Esses canais são definidos de acordo com as características da informação de dados que serão transmitidas pela interface aérea. As informações de dados são organizadas dentro de blocos de transporte, onde cada bloco utiliza um intervalo de transmissão para ser enviado pela interface rádio [39].

5.5 – A CAMADA FISICA LTE

A camada física é a camada de nível mais baixo ou a última camada no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) de redes. Ela é responsável em transmitir as informações do usuário através de um meio físico, logo, a principal função desta camada é garantir que a informação enviada pelo cliente seja recuperada pelo receptor com o menor número possível

de erros [40]. É também nesta camada que são definidas as especificações técnicas referentes à transmissão das informações do usuário através do canal, tais como a modulação, multiplexação, técnicas de acesso, dentre outros. O sistema LTE trabalha com duas técnicas de múltiplo acesso ao meio, uma que opera para o *downlink*, no sentido transmissor ao usuário, denominada OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e outra no *uplink*, sentido contrário, do usuário para o transmissor, denominada SC-FDMA (*Single-carrier Frequency Division Multiple Access*).

5.5.1 – Técnica de Múltiplo Acesso OFDMA

O sistema LTE apresenta um novo esquema de transmissão de dados de interface aérea diferente da tecnologia 3G que utiliza o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). O esquema adotado nas rede 4G é o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), o qual apresenta como característica a transmissão de dados em múltiplas portadoras, simultaneamente, sendo divididas em subportadoras ortogonais de 512, 1024 ou mais, dependendo diretamente da banda adotada pelo sistema [41]. A técnica OFDMA é baseada na modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), a qual trabalha com a ideia de FDM (*Frequency Division Multiplex*), que é utilizada para o *downlink* das redes 4G. O emprego do OFDM foi motivado, basicamente, por duas de suas características mais importantes, a eficiência espectral e robustez frente a canais seletivos em frequência.

A técnica OFDM, assim como no OFDMA, consiste em transmitir paralelamente os dados em diversas subportadoras, os quais terão taxas de transmissão que irão variar de acordo com o tipo de modulação adotada. A modulação utilizada no OFDM dependerá de fatores disponíveis no canal de radio propagação, assim como, pela distância que o terminal móvel se encontra do transmissor, podendo adotar a modulação QAM ou PSK, por exemplo.

A modulação OFDM utiliza o processo matemático FFT (*Fast Fourier Transform*), a fim de possibilitar que as subportadoras se sobreponham sem perder suas características individuais, ou seja, sem interferirem entre si, através do princípio de ortogonalidade. Outros aspectos importantes oferecidos pela técnica OFDM estão listados abaixo:

- Imunidade à interferência;

- Menor desvanecimento seletivo;
- Maior resistência a interferência Inter-simbólica.

5.5.2 – Técnica de Múltiplo Acesso SC-FDMA

A técnica de múltiplo acesso utilizada para o *uplink* no sistema LTE é o SC-FDMA, por apresentar um baixo desvanecimento do parâmetro chamado PAPR (*Peak to Average Power Ratio*), diminuindo assim a necessidade de transmissores complexos.

O SC-FDMA funciona de forma parecida com a técnica OFDMA, porém a transmissão é realizada de forma sequencial e através de uma única portadora, diferentemente do OFDMA que transmite de forma paralela, permitindo assim, que o SC-FDMA apresente um PAPR consideravelmente mais baixo [42]. O objetivo principal na utilização deste método é melhorar o desempenho do sinal transmitido no *uplink*, assim como, a redução de custos nos projetos dos amplificadores utilizados pelos terminais móveis [43].

5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentado, neste capítulo, um breve histórico sobre a rede LTE, assim como, mostrado suas principais características e melhorias em relação às tecnologias passadas, detalhando cada novo elemento presente nesta tecnologia, bem como, os seus funcionamentos.

A camada física do LTE é de fundamental importância para a elaboração ou planejamento de cobertura desta tecnologia, pois a mesma permite estabelecer parâmetros indispensáveis ao projeto da rede 4G.

CAPÍTULO 6 – CAMPANHA DE MEDIÇÕES

6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve a configuração utilizada nas rotas estabelecidas na cidade de Belém, assim como, os equipamentos utilizados para realizar as mesmas. As medições foram realizadas, preferencialmente, em regiões suburbanas da cidade de Belém, mais afastados do centro da cidade, onde a existências de torres de comunicações móveis com sistema LTE instalado é mais escasso, permitindo assim, que o equipamento possa acampar em um único setor.

6.2 - COLETA DE DADOS

Foram realizadas medições de nível sinal na faixa 2,6 GHz, tanto nos bairros centrais da cidade de Belém, os quais possuem configuração de prédios de altura mediana e com densidade média de vegetação, como em bairros mais periféricos, representados por uma quantidade menor de prédios e alta densidade de vegetação. Como nos bairros centrais o terminal móvel não consegue acampar em uma única célula, devido a maior concentração de torres LTE, o móvel solicita constantemente *handover* para a célula com melhor nível de sinal [44]. As medições que apresentaram melhor resultados para o presente trabalho foram as realizadas em bairros mais afastados do centro, onde a quantidade de elementos LTE é mais reduzida, conforme é possível observar na figura 6.1.



Figura 6.1 - Configuração Rota B

6.3 - CONFIGURAÇÃO DO TRANSMISSOR

Os testes foram realizados a partir de antenas de uma operadora de comunicações móveis de âmbito nacional. Os *sites* dessa operadora apresentam configuração padrão, com antenas setorizadas, cada uma direcionada para um azimute específico, com a finalidade de atender a uma determinada região, sendo que a somatória das antenas devem cobrir uma área de 360° do *site*, conforme mostrado na Figura 6.2.

As antenas implantadas nos *sites* utilizadas neste trabalho são do modelo APXVLL13-C da marca RFS, operam na faixa de frequência de 2.2 GHz até 2.7 GHz, com abertura de 60° horizontal e ganho de 18.3 dBi. A altura de instalação do sistema irradiante varia de acordo com a região que será atendida, podendo chegar a altura superior a 100 metros. No caso estudado, as alturas de instalação das antenas variam de 30 a 40 metros.



Figura 6.2 – Setorização das antenas

6.4 - CONFIGURAÇÃO DO RECEPTOR

Foram realizadas rotas pela cidade de Belém, medindo o nível de sinal da operadora, com um *smartphone* da marca LG, modelo *optimos Black P970*, com antena de ganho de 0 dB, em regiões atendidas pela tecnologia LTE. Para que as informações recebidas do *site* fossem gravadas para posterior tratamento.

Foi utilizado o aplicativo para celular chamado *G-NetTrack*, o qual funciona em conjunto com o GPS do celular. A Figura 6.3 ilustra a interface do aplicativo, onde quanto mais quentes as cores, significa que melhor é o nível de sinal no local.

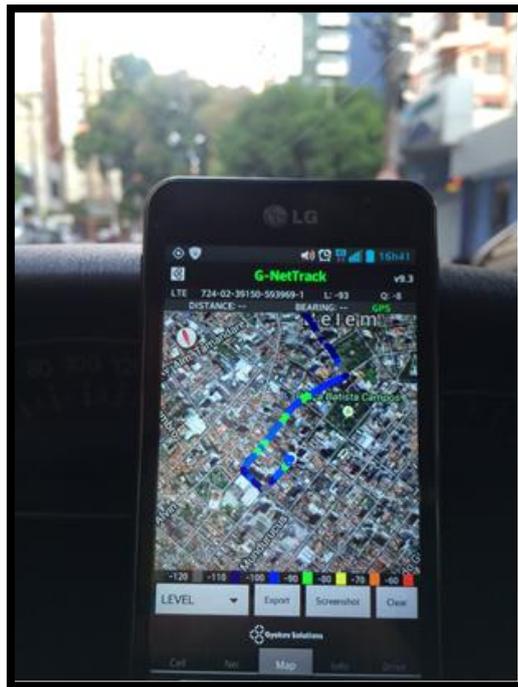


Figura 6. 3 – Interface do aplicativo G-NetTrack

Antes de iniciar os testes, é necessário configurar o aparelho celular com a finalidade de que o mesmo fique preso ou acampado na rede LTE, não permitindo assim, que seja realizado qualquer tipo de *handover*, ou como é denominado nesta tecnologia, que seja feito *CS fallback* (técnica adotada nos sistemas LTE para que o usuário ou equipamento móvel migre para a rede de geração inferior sempre que for percebida uma solicitação de chamada

de voz para o terminal móvel). Esta configuração é realizada através do *field test* do equipamento. Para os celulares LG, deve-se digitar no teclado `*###4636###`, conforme mostrada a tela da Figura 6.4.



Figura 6.4 – Field Test LG

Então, seleciona-se o item “Informações sobre o telefone”, onde é possível identificar todas as configurações do equipamento, bem como, da operadora a qual possui vínculo. Nesta área, deve-se procurar o item “Definir tipo de rede preferida” e selecionar *LTE only*, conforme a Figura 6.5. Desta forma, o terminal móvel ficará obrigatoriamente acampado na rede LTE, mesmo com níveis de sinal bem degradado.

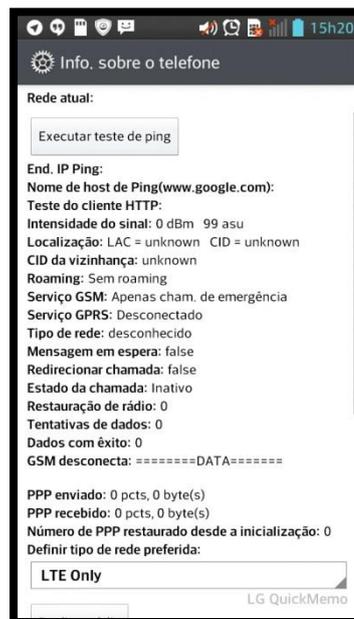


Figura 6.5 – Configuração para acampar na rede LTE

Com esse aplicativo é possível capturar diversas informações da rede como: A taxa de transferência de dados no *upload* e no *download*, níveis de interferências, coordenadas geográficas, nível de sinal que chega ao aparelho do usuário, dentre outras informações de configuração da rede, mostradas na Figura 6.6. Para o presente trabalho foram utilizadas apenas as informações de coordenadas geográficas, para posterior conversão em distância, e nível de sinal.

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Timestamp	Longitude	Latitude	Speed	Operator	CGI	Cellname	CellID	LAC	NetworkMode	Qual	SNR	CQI	LTERSSI	DL_bitrate
2	2015.03.07 09.41.55	-4.846.234	-1.305.298	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	14.4	-	-75	0
3	2015.03.07 09.41.55	-4.846.234	-1.305.299	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	14.4	-	-75	0
4	2015.03.07 09.41.56	-4.846.234	-1.305.299	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	13.6	-	-75	0
5	2015.03.07 09.41.57	-4.846.234	-1.305.299	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	13.6	-	-75	0
6	2015.03.07 09.41.57	-4.846.231	-1.305.283	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	13.6	-	-75	3
7	2015.03.07 09.41.58	-4.846.231	-1.305.283	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	13.6	-	-75	3
8	2015.03.07 09.41.58	-4.846.230	-1.305.274	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	13.6	-	-75	3
9	2015.03.07 09.41.59	-4.846.230	-1.305.274	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	21.0	-	-74	0
10	2015.03.07 09.42.00	-4.846.230	-1.305.274	0	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	21.0	-	-74	0
11	2015.03.07 09.42.00	-4.846.230	-1.305.264	3	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	21.0	-	-74	0
12	2015.03.07 09.42.01	-4.846.230	-1.305.264	3	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	21.0	-	-74	0
13	2015.03.07 09.42.01	-4.846.232	-1.305.252	7	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	21.0	-	-74	0
14	2015.03.07 09.42.02	-4.846.232	-1.305.252	7	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-6	21.2	-	-73	0
15	2015.03.07 09.42.02	-4.846.233	-1.305.243	3	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-6	21.2	-	-73	0
16	2015.03.07 09.42.03	-4.846.233	-1.305.243	3	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-6	21.2	-	-73	0
17	2015.03.07 09.42.03	-4.846.240	-1.305.225	18	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-6	21.2	-	-73	0
18	2015.03.07 09.42.04	-4.846.240	-1.305.225	18	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-6	21.2	-	-73	0
19	2015.03.07 09.42.04	-4.846.244	-1.305.230	14	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-6	21.2	-	-73	0
20	2015.03.07 09.42.05	-4.846.244	-1.305.230	14	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	18.0	-	-75	0
21	2015.03.07 09.42.05	-4.846.247	-1.305.234	14	72402	7,24024E+14	593992	3	39152	LTE	-7	18.0	-	-75	0

Figura 6.6 – Informações coletadas através do *G-NetTrack*

6.5 – CONFIGURAÇÃO DAS ROTAS

A configuração padrão de um transmissor em *sites* de comunicações móveis é a torre possuir antenas setorizadas, cada uma responsável em atender uma região específica. As coletas de dados foram salvas em txt, onde o nível de sinal de cada setor foi separado e, posteriormente, foram pós-processadas as informações dos setores que apresentaram o maior número de amostras.

Primeiramente, foi selecionada uma rota com quantidade suficiente de amostras que pudessem ser utilizadas nos ajustes dos modelos de perda de propagação através do algoritmo genético. A rota escolhida para este propósito foi a do transmissor denominado como site A, as demais medições e rotas realizadas pela cidade, foram nomeadas cada uma com o seu respectivo transmissor *best server*. Na Figura 6.6 é mostrada a área de cobertura que o *site A* atende (medições de ajuste) e ao lado é mostrado umas das regiões que servirá como teste,

após a otimização do AG, atendida pelo site B (medições de teste), o qual será apresentado no próximo capítulo.



Figura 6.7 - Campanha de medição do site A e do site B

As medições realizadas no percurso do site A (rota considerada para os ajustes dos modelos), foram feitas na Rodovia Augusto Montenegro, no sentido de Icoaraci. Essa trajetória é caracterizada por vegetação bem densa, em alguns trechos, e por construções pequenas, apresentando construções elevadas em pontos isolados, conforme mostra a Figura 6.7.

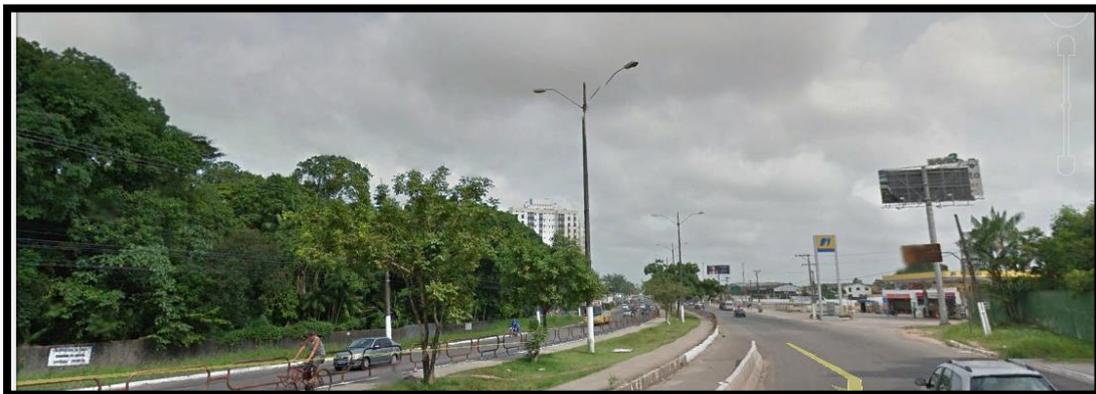


Figura 6.8 – Caracterização da rota A

6.6 - COMPARAÇÕES DAS MEDIÇÕES COM MODELOS ESTUDADOS

Para se realizar a diferença entre os valores medidos e os valores preditos pelos modelos de perda de propagação, foram calculados os valores de erro médio absoluto, desvio padrão (DP) e erro médio quadrático (RMS). Sendo o erro médio absoluto caracterizado por ser o valor médio de todas as diferenças, positivas e negativas, entre os modelos de predição e o valor medido em cada ponto e é representado pela equação:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |PL_i^{Medido} - PL_i^{Simulado}| \quad (6.1)$$

Onde N é o número total de medidas.

O desvio padrão é encontrado através da dispersão estatística entre os valores medidos e os calculados, funcionando como um indicador de qualidade para os modelos, é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |PL_i^{Medido} - PL_i^{Simulado}|^2} \quad (6.2)$$

E, por fim, o erro médio quadrático, representa a razão entre o erro médio absoluto e o desvio padrão, expresso pela equação abaixo:

$$RMS = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} \quad (6.3)$$

As Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 mostram os resultados da comparação entre os modelos preditos utilizados neste artigo e o sinal medido através das campanhas de medições. Porém, para o caso apresentado aqui, a perda mostrada através do nível de sinal medido, levou em consideração do percurso do site A.

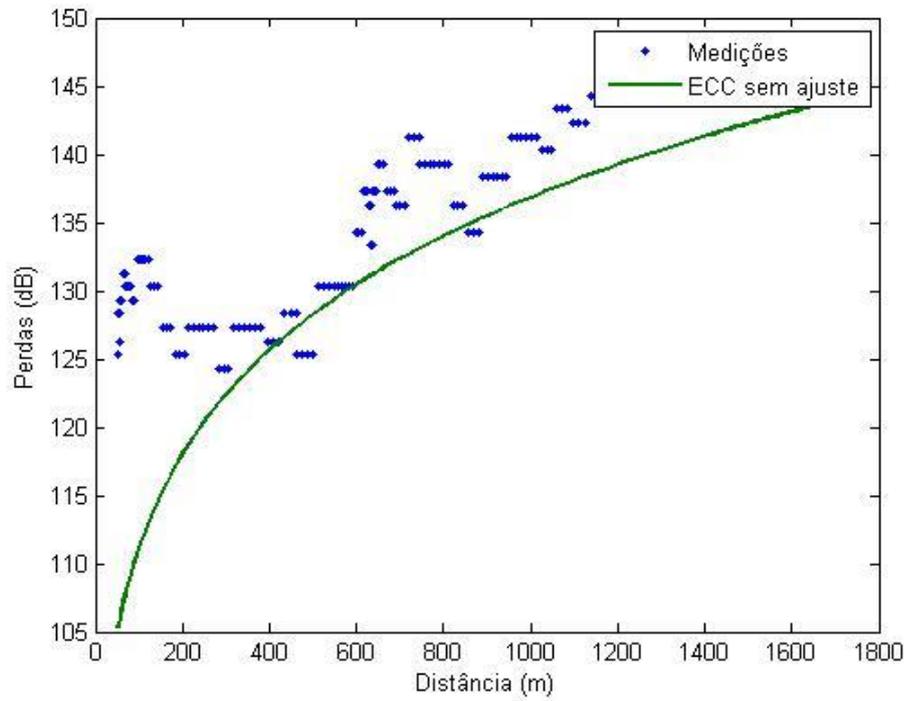


Figura 6.9 - Comparação entre o modelo ECC e o sinal medido

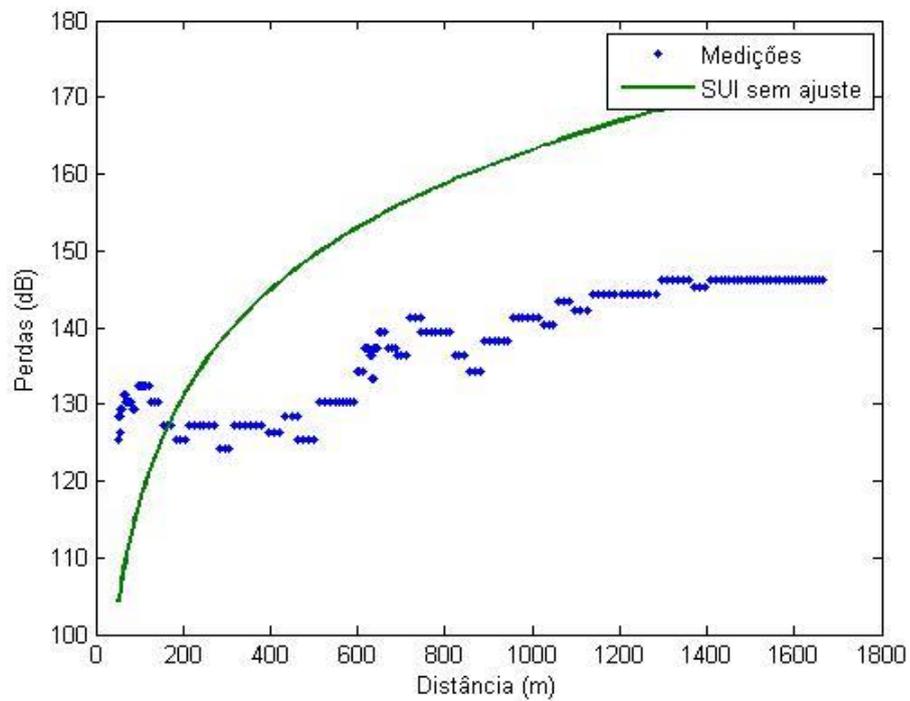


Figura 6.10 - Comparação entre o modelo SUI e o sinal medido.

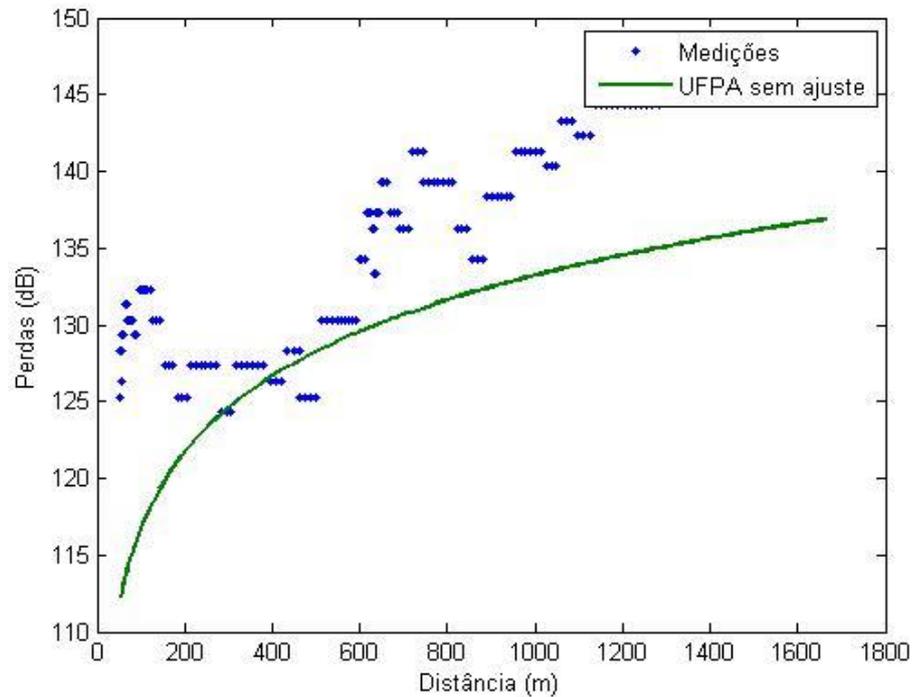


Figura 6.11 - Comparação entre o modelo UFPA e o sinal medido.

A Tabela 6.1 apresenta os valores de erros médios quadráticos e desvio padrão entre os dados medidos e previstos pelos modelos adotados, para o percurso do *site* A.

Tabela 6.1 Desempenho dos Modelos de Propagação para os dados coletados

	UFPA(dB)	ECC(dB)	SUI(dB)
Erro médio	9,3009	9,9903	20,5423
Desvio Padrão	4,4247	6,822	5,5786

Como é possível observar através da Tabela 6.1 e nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11, os modelos de propagação para ambientes *outdoor* não apresentaram um bom ajuste quando comparados com a perda medida. Apesar dos modelos utilizarem constantes de ajustes em suas fórmulas para melhor acompanhar a curva de perda do sinal, estas constantes foram elaboradas para uma característica de ambiente em um cenário específico.

Com o intuito de melhorar o desempenho na predição dos modelos de perda de propagação acima, para os diversos percursos realizados, foi implementado um Algoritmo Genético para os modelos, a fim de otimizar os valores das constantes de ajustes para cada um deles.

6.7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia utilizada, em relação ao *set-up* das rotas de medições realizadas na cidade de Belém, assim como, a comparação das perdas obtidas na campanha de medição com os modelos estudados no trabalho, mostrando qual melhor se adequa ao sistema proposto, sem utilizar qualquer otimização nos modelos.

CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E ANÁLISES

7.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após a comparação entre as perdas preditas pelos modelos estudados e as perdas medidas, foi observado um erro elevado para todos os modelos. Este capítulo irá apresentar as análises e resultados dos modelos após a utilização de algoritmo genético para a otimização dos modelos, a fim de minimizar as diferenças entre os valores preditos e o sinal medido.

7.2 – OTIMIZAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS

Conforme mencionado anteriormente, foram realizadas campanhas de medição na cidade de Belém, principalmente por bairros mais afastados, tendo em vista serem áreas de bordas para a cobertura LTE, já que a implementação da tecnologia LTE ainda apresenta cobertura parcial para a área metropolitana de Belém, também conhecida como grande Belém.

Foi realizada a seguinte metodologia no processo de otimização: A rota que representa o site A, foi destinada a otimização dos modelos, logo, o algoritmo genético utilizou essa medição para propor novos valores de ajustes para os modelos estudados. Já as outras 3 rotas restantes, foram utilizadas para a análise e comparação do desvio padrão e erro médio dos modelos otimizados com os modelos padrões.

As Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 mostram as comparações dos modelos de predição de perda de propagação ECC, SUI e UFPA respectivamente, com a predição dos modelos que foram otimizados com ajuda do AG.

Conforme já mencionado, a Figura 7.1 apresentam as perdas de propagação do modelo ECC, com e sem otimização do AG, comparados com as perdas medidas na campanha de medição realizada em alguns bairros da cidade de Belém, cada rota caracterizada por uma cor diferente.

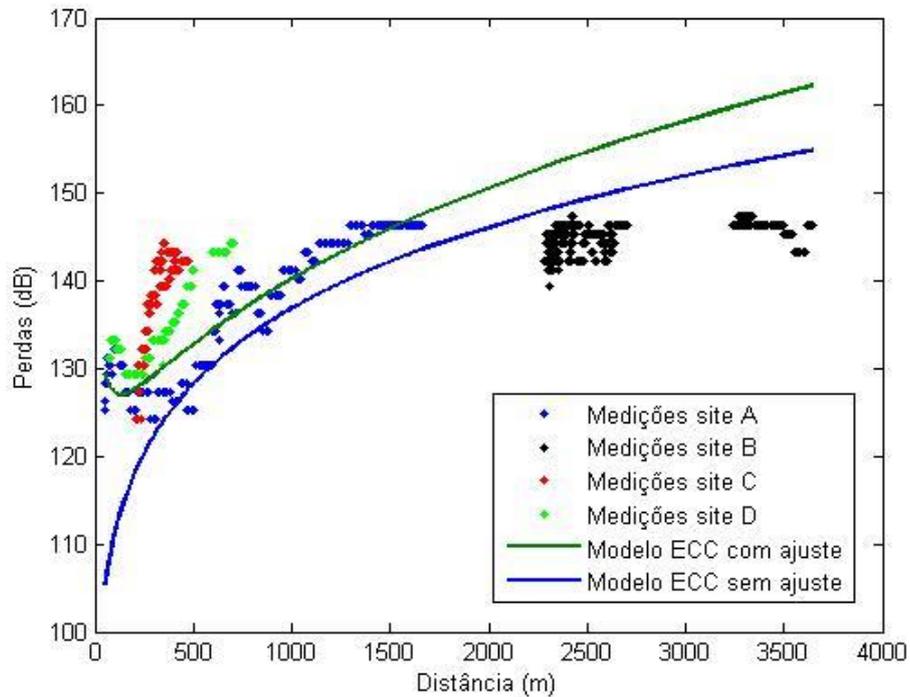


Figura 7.1 - Predição do modelo ECC padrão e otimizado

No modelo de perda de propagação ECC, foram otimizadas as constantes para os fatores de ganho da antena transmissora e o fator de ganho da antena receptora, mostrado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Constantes otimizadas no modelo ECC

Parâmetros	Padrão	Otimizado
X1	13,958	17,4875
X2	5,8	24,1292
X3	0,795	1,2521
X4	1,862	3,2031

Para o modelo ECC-33, apesar de ser de fácil implementação, foi o modelo que apresentou melhorias menos significativas do que os demais modelos, após a otimização dos parâmetros de suas constantes. Esse perfil do modelo pode ser justificado devido a falta de parâmetros em sua estrutura que possa caracterizar os terrenos analisados.

Já na Figura 7.2 é possível observar as perdas de propagação do modelo SUI, com e sem otimização do AG, comparados com as perdas medidas na campanha de medição em Belém.

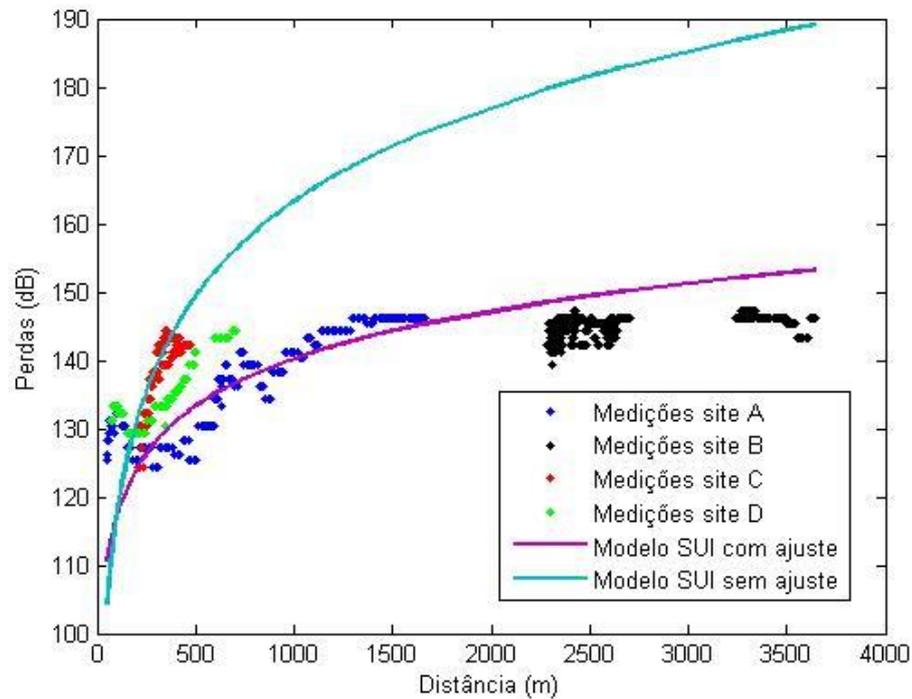


Figura 7.2 - Predição do modelo SUI padrão e otimizado

Para o modelo SUI, foram otimizadas as constantes do expoente de perda de propagação para o tipo de terreno estudado, mostrado na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Constantes otimizadas no modelo SUI

Parâmetros	Padrão	Otimizado
a	4,6	2,2374
b	0,0075	0,0075
c	12,6	15,1046

A curva de perda de propagação apresentou uma adequação mais próxima da perda medida, após os parâmetros otimizados serem adotados ao modelo SUI, devido justamente a caracterização do perfil do terreno contemplado na estrutura do modelo SUI. Conforme mostrado na Figura 7.2.

Por fim, a Figura 7.3 mostra as perdas de propagação do modelo UFPA, com e sem otimização do AG, comparados com as perdas medidas na campanha de medição em Belém, onde cada rota é representada por uma cor diferente.

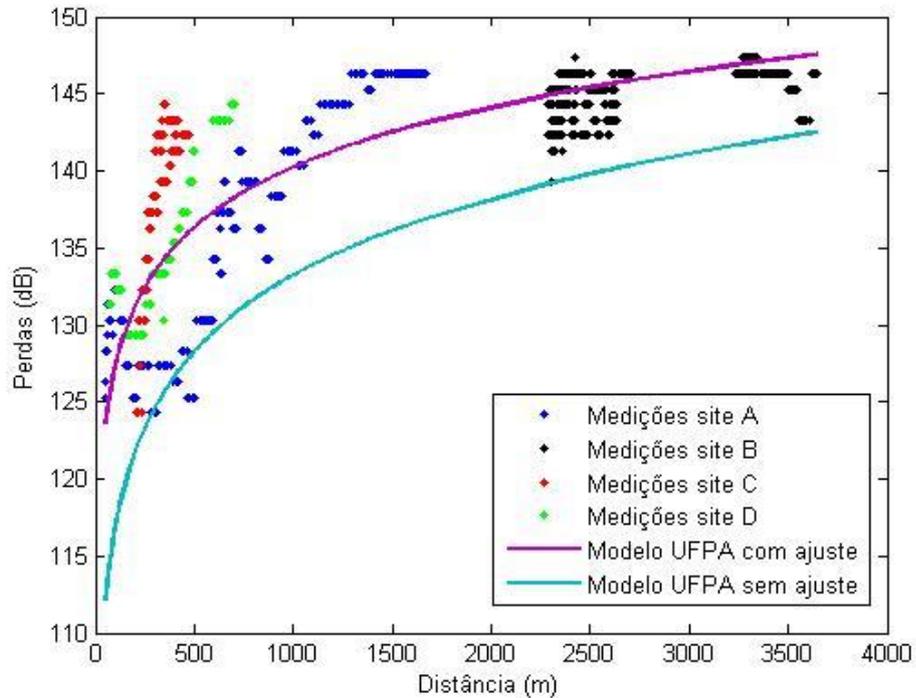


Figura 7.3 - Predição do modelo UFPA padrão e otimizado

O algoritmo genético foi utilizado para otimizar as constantes implementadas na perda de propagação do modelo UFPA, detalhados na Tabela 7.3:

Tabela 7.3 - Constantes otimizadas no modelo UFPA

Parâmetros	Padrão	Otimizado
K ₁	16,5155	13,0165
K ₂	14,1878	15,4352
a	42,49	57,574
b	7,68	8,835
H _{OB}	50	45,9569

O modelo obtido, após a otimização dos seus parâmetros, demonstra um ajuste mais adequado às perdas de propagação medidas nas campanhas do site B, C e D, como mostrado na Figura 7.3.

Na Tabela 7.4 é possível visualizar os valores de erro médio quadrático e desvio padrão dos modelos estudados, antes de serem otimizados e após os parâmetros serem ajustados utilizando Algoritmo Genético, lembrando que os valores das constantes nos modelos pós otimização foram obtidos a partir das medições no site A.

Tabela 7.4 - Desempenho dos Modelos de Propagação para os dados coletados antes e após otimização

	Sem Otimização		Com Otimização	
	Erro Médio(dB)	Desvio Padrão(dB)	Erro Médio(dB)	Desvio Padrão(dB)
UFPA	8,23	4,51	3,72	2,37
ECC	9,61	5,13	9,46	4,57
SUI	29,17	15,02	7,28	3,65

Os modelos UFPA e SUI apresentaram valores de erro médio e desvio padrão menores, logo, as perdas previstas por esses modelos, tiveram um ajuste mais adequado as perdas medidas. Porém, o modelo ECC não apresentou um ajuste significativo de seus valores das perdas medidas, o que pode ser justificado por sua fórmula não possuir constantes de ajustes.

7.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as otimizações realizadas nos modelos de propagação aqui utilizados, assim como, os parâmetros selecionados para o ajuste.

Posteriormente, foi realizada uma comparação entre o erro médio e desvio padrão para cada modelo, mostrando qual modelo melhor atende a predição no ambiente estudado.

CONCLUSÃO

As comunicações móveis surgiram, inicialmente, com o intuito de prestar serviço unicamente para voz, logo, trabalhariam especificamente no modo *circuit switched*, porém este panorama vem mudando com o passar do tempo, exigindo assim, que operadoras também se adequem a este novo cenário. A demanda por tráfego de dados vem crescendo de forma exponencial nos últimos anos e, em muitos casos já ultrapassa o tráfego de voz, fato que pode ser justificado pelos novos aplicativos desenvolvidos para os usuários móveis, fazendo com que os mesmos permaneçam conectados por mais tempo à rede.

Surge então a tecnologia LTE, que foi criada e desenvolvida desde sua fase inicial para atender este novo perfil de assinante, oferecendo uma rede que opere integralmente no modo *packet switched* privilegiando, desta forma, o tráfego de dados, e onde a comunicação por voz só é possível através da utilização de VoIP (*Voice Over Internet Protocol*).

Neste contexto, o presente trabalho propôs a avaliação do comportamento de alguns modelos de propagação existentes na literatura aplicáveis a faixa de 2.6GHz, a fim de se estabelecer previsões de perda de propagação satisfatórias com os níveis medidos ao longo de campanhas de medições realizadas na cidade de Belém do Pará. Foi proposto um método de otimização para os modelos de perda de propagação utilizando algoritmos genéticos, na tentativa de minimizar a diferença entre os valores medidos e preditos.

Inicialmente, sem que os modelos sejam ajustados com Algoritmo Genético, o modelo que apresentou melhor ajuste a perda medida foi o UFPA, seguido pelo modelo ECC. Já o modelo SUI apresentou uma discrepância muito elevada, apresentando valor de erro médio quadrático de 29,17 dB.

Após os modelos serem otimizados com ajuda do AG, os modelos UFPA e SUI apresentaram bons resultados em relação às medições utilizadas no processo de ajuste, sendo que o modelo UFPA foi o que apresentou melhor desempenho devido possuir em sua fórmula parâmetros que caracterizam com maior fidelidade a perda de propagação ao longo do percurso, seguido pelo modelo SUI. O ECC foi o modelo que menos se ajustou à perda

medida, o que é justificado por sua fórmula não apresentar fatores que caracterizam o perfil do terreno.

Desta forma, o algoritmo genético demonstrou ser uma ferramenta robusta, de fácil entendimento e implementação, na otimização de modelos de propagação do ambiente estudado. Colaborando desta forma com otimizações para futuros planejamentos de rede LTE, a fim de que se possa dimensionar de forma correta, desde a fase inicial de projeto, a cobertura do sistema irradiante de um equipamento de tecnologia 4G que trabalha na faixa de frequência de 2.6GHz.

Existem várias possibilidades para trabalhos futuros, correlacionados com o trabalho aqui apresentado, como traçar novas rotas por toda a cidade, contemplando regiões mais central da cidade, caracterizada por locais arborizados e prédios muito altos, assim como, outros municípios próximos da capital, que já possuem implantação de rede LTE, a fim de verificar uma rede com menos elementos instalados. É possível, também, adotar novas métricas utilizando variáveis de QoS e QoE, assim como *throughput* da rede.

Outra proposta seria comparar as medições realizadas com o terminal móvel do cliente, assim como, medir o sinal propagado através de analisador de espectro e antena direcional que opere na faixa de frequência do sistema LTE, analisando as perdas em ambos os casos.

REFERÊNCIAS

- [1] Lyra, B.S. "Modelo de propagação para redes sem fio fixas na banda de 5,8 GHz em cidades típicas da região amazônica".2009.21f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Pará, 2009.
- [2] Costa J. S. M., Uma Metodologia para Predição do Campo Elétrico de Radiodifusão Sonora em Ondas Medias Utilizando Interferências Bayesianas, PP 30-39, Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFPA 2013.
- [3] M. A. Pereira, "Análise de Modelos de Propagação na área Urbana da Região de Curitiba – PR na faixa de frequência de 1800 MHz". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.
- [4] R. Silva, "Características da Propagação Ponto-àrea na Faixa de 2 a 15 GHz com Aplicações em Comunicações Móveis". Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2004.
- [5] H.R. Anderson, "Fixed Broadband Wireless System Design", Inglaterra, John Willey & Sons, 2003.
- [6] K.R. Schaubach, N.J. Davis, T.S. Rappaport, "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments", IEEE 42nd Vehicular Technology Conference", Vol. 2, pp. 932-935, Maio 1992.
- [7] S.R. Saunders, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [8] ABHAYAWARDHANA, V.S. et al., "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems". IEEE 61st Vehicular Tech. Conference, Vol. 1, pp.73-77, Junho. 2005.
- [9] H.R. Anderson, "Fixed Broadband Wireless System Design", Inglaterra, John Willey & Sons, 2003.
- [10] V. Erceg et. al, "Channel models for fixed wireless application", Tech. rep. IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, Janeiro 2001.
- [11] V. Erceg et. al, "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments", IEEE JSAC, vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, Julho 1999.
- [12] - J.C. Rodrigues, S.G.C. Fraiha, H.S. Gomes, G.P.S. Cavalcante, "Path Loss Model for Densely Arboreous Cities in Amazon Region", International Conference on Microwave and Optoelectronics, pp. 629-632, Julho 2005.

- [13] S.G.C. Fraiha, J.C. Rodrigues, G.H.S. Carvalho, G.P.S. Cavalcante. "The compromise with the covered area and the Bit Error Rate in a suburban environment densely arboreous", *Internacional Telecommunications Symposium*, pp. 456-460, Setembro 2006.
- [14] Dias, J.S.; Barreto, J.M. (1998), "Algoritmo genético: inspiração biológica na solução de problemas - uma introdução", *Revista Marítima Brasileira - Suplemento Especial, Pesquisa Naval*, nº 11, p. 105-128.
- [15] Srinivas, M.; Patnaik, L.M. (1994), "Genetic algorithms: A survey", *IEEE*.
- [16] Darwin, C. (2004), "A origem das espécies". Rio de Janeiro: Ediouro.
- [17] Stearns, S.C. (2003), "Evolução: uma introdução", Atheneu: São Paulo.
- [18] Aytug, H.; Khouja, M. & Vergara, F., A review of the use of genetic algorithms to solve production and operations management problem. *International Journal of Production Research*, 41(17):3955-4009, 2003.
- [19] VARÃO, L. R. Avaliação de desempenho de um sistema de geração eólica integrada a um sistema de potência utilizando algoritmos genéticos. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [20] Shen, Jianjun. Genetic algorithms and genetic programming. GA-GP-text.pdf, University Bielefeld, Germany. 2000. 14 p.
- [21] Davis, L., 1991, "Handbook of Genetic Algorithms," Van Nostrand Reinhold, New York.
- [22] L. W. T. Silva, "Otimização do Controle eletrônico do Diagrama de Radiação de Arranjos Usando Algoritmos Genéticos com Codificação Real". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006.
- [23] Linden, Ricardo, "Algoritmos Genéticos". Segunda Edição, Brasport. Rio de Janeiro, 2008.
- [24] N. S. Sivanandam, N. S.; N. S. Deepa, "Introduction to Genetic Algorithms". Springer, 2008.
- [25] S. L. Ávila, "Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Novembro, 2002.
- [26] Barboza, A. O., Simulação e Técnicas da Computação Evolucionário Aplicadas a Problemas de Programação Linear Inteira. Mista. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), CPGEI, Curitiba, PR, 2005.

- [27] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, "Genetic Algorithm in Engineering Electromagnetics", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 39, Nº. 4, Aug. 1997, pp.7-21.
- [28] A. C. Gustavo, "Otimização de Modelos de Predição da Perda de Propagação Aplicáveis em 3,5 GHz Utilizando Algoritmos Genéticos". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.
- [29] Sirinvas M.; Patnaik L. M. "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms". IEEE – Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 24, n. 4, p. 656-667, abr. 1994.
- [30] Hicks, C., A genetic algorithm tool for optimizing cellular or functional layouts in the capital goods industry. International Journal of Production Economics, 104(2):598-614, 2006.
- [31] S. Glisic, Advanced wireless communications: 4G technologies. New Delhi: John Wiley & Sons, 2006.
- [32] C. Chevallier, C. Brunner, A. Garavaglia, K. Murray e K. Baker, WCDMA (UMTS) Deployment Handbook. New Delhi: John Wiley & Sons, 2006.
- [33] ERICSSON. LTE – An Introduction. White Paper, Junho 2009, <<http://www.ericsson.com>>.
- [34] S. MARTIN. Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together – LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0. John Wiley & Sons; 2009.
- [35] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 9).
- [36] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 7), 3GPP, 3GPP TR 25.913.
- [37] S. Sesia, I. Toufik e M. Baker, LTE: The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. New Delhi: John Wiley & Sons, 1st ed., 2009.
- [38] H. Holma e A. Toskala, WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE. New Delhi: John Wiley & Sons, 4th ed., 2007.
- [39] 3GPP TS 25.346, version 8.1.0, "Introduction of the Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) in the Radio Access Network (RAN)", Mar. 2008.
- [40] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold e P. Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband. Elsevier, 1st ed., 2007.

- [41] A. Bahai, Multi-carrier digital communications: theory and applications of OFDM, 2nd ed. New York,: Springer, 2004.
- [42] F. N. N. João, “Análise de Desempenho em Redes Móveis Long Term Evolution”.2012.16f.Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Eletrônica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.2012.
- [43] G. P. Aquino e L. L. Mendes, “Comparação entre técnicas de redução da PAPR em sinais OFDM” em Anais do XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Curitiba- PR., 2011. v. 1.
- [44] R. P. Márcio, S.B. Gilvan, S.L. Bruno, P.S.C. Gervásio “Empirical Model for LTE Outdoor Planning Using a Hybrid Approach: Measuring and the Genetic Algorithm Technique”. International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communication. Dubai.Jan.2015.