



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**OTIMIZAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA PERDA DE  
PROPAGAÇÃO APLICÁVEIS EM 3,5 GHZ UTILIZANDO  
ALGORITMOS GENÉTICOS**

**GUSTAVO ARAÚJO CAVALCANTE**

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente da  
Coordenação do Programa de Pós-graduação da  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte  
dos requisitos necessários para obtenção do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Prof. Adaildo Gomes d'Assunção – UFRN – CT – DEE.  
Co-Orientador: Prof. Ronaldo de Andrade Martins – UFRN – CT – DEE.

NATAL – RN

2010

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila  
Mamede

Cavalcante, Gustavo Araújo.

Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis em 3,5GHZ utilizando algoritmos genéticos / Gustavo Araújo Cavalcante. – Natal, RN, 2010.

73 f.

Orientador: Adaildo Gomes D'Assunção.

Co-orientador: Ronaldo de Andrade Martins.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Comunicação sem fio – Dissertação. 2. Algoritmos genéticos – Dissertação. 3. Otimização – Dissertação. 4. Modelos de predição de perda de propagação – Dissertação. I. D'Assunção, Adaildo Gomes. II. Martins, Ronaldo de Andrade. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.


RN/UF/BCZM

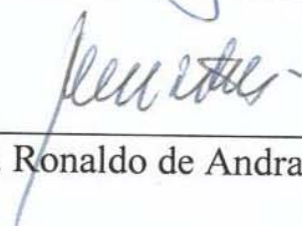
CDU 621.39(043.3)

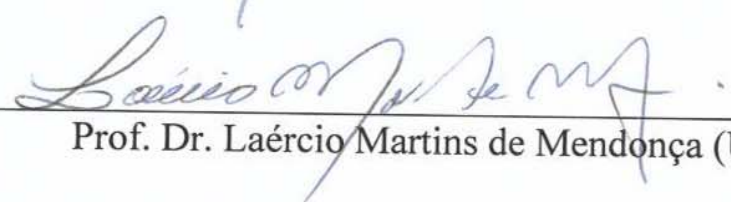
# OTIMIZAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO APLICÁVEIS EM 3,5 GHZ UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

**GUSTAVO ARAÚJO CAVALCANTE**

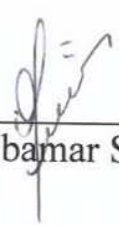
Dissertação de Mestrado em Engenharia  
Elétrica, aprovada em 9 de julho de 2010,  
pela banca examinadora, formada pelos  
seguintes membros:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção (UFRN)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ronaldo de Andrade Martins (UFRN)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça (UFRN)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alfrêdo Gomes Neto (IFPB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José de Ribamar Silva Oliveira (IFRN)

NATAL - RN

A todos aqueles que eu amo, com carinho.

# AGRADECIMENTOS

---

A Deus pela oportunidade e sabedoria concedida para a realização deste trabalho.

Ao meu pai, Alcindo de Oliveira Cavalcanti (*in memoriam*) e à minha mãe, Joana Araújo Cavalcante, por tudo que sou hoje e por tudo que eles tem me dado durante todos estes anos.

À minha irmã Laís, pelo incentivo, carinho e apoio dado durante esses dois anos.

Às minhas tias e aos meus tios, pelo carinho, apoio, conselhos e incentivos.

Ao Prof. Adaildo Gomes d'Assunção, por tudo o que ele representa como Educador, Pesquisador, Professor, Orientador e Amigo.

Ao Prof. Ronaldo de Andrade Martins, pela amizade, estímulo e incentivo durante a orientação deste trabalho.

Aos amigos: Bruno, Lincoln, Iradilson, Ricardo, Robson e Valdez, pela presença constante e ajuda incondicional durante a realização deste trabalho.

Aos demais professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e da Computação – PPgEEC e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações sem Fio – INCT/CSF.

À Linear Equipamentos Eletrônicos S.A. por nos ceder o equipamento de transmissão necessário par o desenvolvimento deste trabalho

À CAPES pelo suporte financeiro.

# RESUMO

---

O setor de telecomunicações vem passando por grandes transformações, devido ao aumento da busca por acesso a serviços digitais de transmissão de dados, vídeo e multimídia, especialmente, por meios das redes de telefonia móvel. Recentemente, no Brasil, as operadoras de telefonia móvel vêm atualizando suas redes para sistemas de terceira geração (3G) proporcionando aos usuários serviços em banda larga como vídeo conferência, Internet e TV digital, dentre outros. Essas novas redes que proporcionam mobilidade e elevadas taxas de transmissão têm permitido o desenvolvimento de novos conceitos de mercado de serviços. Atualmente o mercado está voltado para a expansão da tecnologia WiMAX, que vêm ganhando cada vez mais o mercado das comunicações móveis de voz e de dados. No Brasil o interesse comercial para esta tecnologia aparece com a primeira outorga de licenças em 3,5 GHz. Em fevereiro de 2003, a ANATEL realizou a licitação 003/2002/SPV-ANATEL, onde ofereceu blocos de frequência em 3,5 GHz. As operadoras que adquiriram os blocos de frequência foram: Embratel, Brasil Telecom (Vant), Grupo Sinos, Neovia e WKVE, cada uma com operações distribuídas em regiões do Brasil. Para que esse e outros sistemas de comunicações sem fio sejam implementados com eficiência, muitos esforços têm sido investidos na tentativa de desenvolvimento de métodos de simulação, de predição e de cobertura que se aproximem da realidade o melhor possível, de forma a que se possam tornar ferramentas fiéis e indispensáveis no planejamento dos sistemas de comunicações sem fio. Neste trabalho, foi desenvolvido um algoritmo genético (AG's) capaz de otimizar os modelos de predição de perda de propagação aplicáveis na frequência de 3,5 GHz, possibilitando dessa forma uma estimativa do sinal mais próxima da realidade, evitando erros significativos no planejamento e implementação de um sistema de comunicação sem fio.

**Palavras-chave:** Comunicações sem fio, algoritmos genéticos, otimização, modelos de predição de perda de propagação

# ***ABSTRACT***

---

The telecommunications industry has experienced recent changes, due to increasing quest for access to digital services for data, video and multimedia, especially using the mobile phone networks. Recently in Brazil, mobile operators are upgrading their networks to third generations systems (3G) providing to users broadband services such as video conferencing, Internet, digital TV and more. These new networks that provides mobility and high data rates has allowed the development of new market concepts. Currently the market is focused on the expansion of WiMAX technology, which is gaining increasingly the market for mobile voice and data. In Brazil, the commercial interest for this technology appears to the first award of licenses in the 3.5 GHz band. In February 2003 ANATEL held the 003/2002/SPV-ANATEL bidding, where it offered blocks of frequencies in the range of 3.5 GHz. The enterprises who purchased blocks of frequency were: Embratel, Brazil Telecom (Vant), Grupo Sinos, Neovia and WKVE, each one with operations spread in some regions of Brazil. For this and other wireless communications systems are implemented effectively, many efforts have been invested in attempts to developing simulation methods for coverage prediction that is close to reality as much as possible so that they may become believers and indispensable tools to design wireless communications systems. In this work was developed a genetic algorithm (GA's) that is able to optimize the models for predicting propagation loss at applicable frequency range of 3.5 GHz, thus enabling an estimate of the signal closer to reality to avoid significant errors in planning and implementation a system of wireless communication.

**Key-words:** Wireless communication, Genetic Algorithms, Optimization, Path Loss Prediction Models.

# SUMÁRIO

---

Agradecimentos	iv
Resumo	v
<i>Abstract</i>	vi
Sumário	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 – Evolução Tecnológica .....	1
1.2 – Objetivos da Dissertação .....	4
1.3 – Organização da Dissertação .....	4
<b>Capítulo 2 – Canal de Rádio Propagação</b>	<b>6</b>
2.1 – Introdução .....	6
2.2 – Conceitos Básicos .....	6
2.3 – Propagação no Espaço Livre .....	8
2.4 – Modelo de Reflexão no Solo com Dois Raios .....	11
2.5 – Modelo de Difração de Gume de Faca .....	13
2.6 – Considerações Finais .....	16
<b>Capítulo 3 – Predição de Perda de Propagação</b>	<b>17</b>
3.1 – Introdução .....	17
3.2 – Classificação dos Modelos de Perda de Propagação .....	17
3.3 – Classificação de Ambientes .....	18
3.4 – Modelos de Predição da Perda de Propagação .....	18
3.4.1 – Modelo Stanford University Interim (SUI) .....	19
3.4.2 – Modelo ECC-33 .....	21
3.5 – Considerações Finais .....	22
<b>Capítulo 4 – Algoritmos Genéticos</b>	<b>23</b>
4.1 – Introdução .....	23



4.2 – Breve Histórico dos Algoritmos Genéticos AG's .....	23
4.3 – Conceito, Estrutura e Funcionamento dos Algoritmos Genéticos .....	24
4.3.1 – Inicialização .....	26
4.3.2 – Avaliação .....	26
4.3.3 – Codificações de Variáveis .....	27
4.3.3.1 – Codificação Binária .....	27
4.3.3.2 – Codificação Gray .....	27
4.3.3.3 – Codificação Real .....	28
4.3.4 – Operadores Genéticos .....	28
4.3.4.1 – Seleção .....	29
4.3.4.1.1 – Método da Roleta .....	29
4.3.4.1.2 – Método do Ranking .....	31
4.3.4.1.3 – Método do Torneio .....	31
4.3.4.2 – <i>Crossover</i> .....	32
4.3.4.2.1 – <i>Crossover</i> de Um Ponto .....	32
4.3.4.2.2 – <i>Crossover</i> de Dois Pontos .....	33
4.3.4.2.3 – <i>Crossover</i> Uniforme .....	33
4.3.4.3 – Mutação .....	34
4.4 – Critérios de Convergência .....	34
4.5 – Considerações Finais .....	35
<b>Capítulo 5 – <i>Set-up</i> de Medições</b> .....	<b>36</b>
5.1 – Introdução .....	36
5.2 – Local das Medições .....	36
5.3 – <i>Set-up</i> de Transmissão .....	38
5.4 – <i>Set-up</i> de Recepção .....	39
5.5 – Campanha de Medições .....	40
5.6 – Considerações Finais .....	41
<b>Capítulo 6 – Análise de Resultados</b> .....	<b>42</b>
6.1 – Introdução .....	42
6.2 – Comparações das Medições vs. Modelos .....	42
6.3 – Otimização dos Modelos SUI e ECC-33 .....	44
6.4 – Considerações Finais .....	48
<b>Capítulo 7 – Conclusão</b> .....	<b>49</b>

<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>51</b>
<b>Apêndice A</b>	<b>54</b>
A.1 – Sistema Simplex de Microondas Analógico para TV .....	54
A.2 – Antena Transmissora .....	55
A.3 – Cabo DLC 231 Premium .....	57
A.4 – Conectores .....	58

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Fenômenos básicos de propagação das ondas eletromagnéticas .....	7
Figura 2.2 – Desvanecimento espacial .....	8
Figura 2.3 – Propagação no espaço livre .....	9
Figura 2.4 – Modelo de reflexão no solo com dois raios .....	11
Figura 2.5 – Método das imagens .....	12
Figura 2.6 – Gume de faca .....	14
Figura 2.7 – Representação gráfica de $G_d(dB)$ em função de $\nu$ .....	15
Figura 3.1 – Expoente de perda de propagação para os tipos de terrenos do modelo SUI .....	21
Figura 4.1 – Fluxograma básico de um algoritmo genético .....	25
Figura 4.2 – Distribuição dos indivíduos na roleta .....	30
Figura 4.3 – Método do Torneio .....	32
Figura 4.4 – <i>Crossover</i> de um ponto .....	33
Figura 4.5 – <i>Crossover</i> de dois pontos .....	33
Figura 4.6 – <i>Crossover</i> uniforme .....	34
Figura 4.7 – Operador de Mutação .....	34
Figura 5.1 – Campus da UFRN – I .....	36
Figura 5.2 – Campus da UFRN – II .....	37
Figura 5.3 – Campus da UFRN – III .....	37
Figura 5.4 – Campus da UFRN – V .....	37
Figura 5.5 – Prédio sede do INCT/CSF – Antena transmissora .....	38
Figura 5.6 – Sistema simplex de microondas analógico para TV .....	38
Figura 5.7 – Conjunto de transmissão .....	39
Figura 5.8 – Analisador de Espectro <i>FSH6</i> .....	40
Figura 5.9 – Rotas das medições .....	40
Figura 5.10 – Perda de propagação no campus da UFRN .....	41
Figura 6.1 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo SUI .....	43
Figura 6.2 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo ECC-33 .....	44
Figura 6.3 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelos SUI e ECC-33 ...	44
Figura 6.4 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo SUI Otimizado ....	46

Figura 6.5 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo ECC-33	46
Otimizado .....	
Figura 6.6 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo Proposto .....	47

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo SUI .....	21
Tabela 4.1 – Termologias utilizada nos Algoritmos Genéticos .....	24
Tabela 4.2 – Comparação da Codificação Binária e a Codificação Gray .....	28
Tabela 4.3 – Método da Roleta .....	30
Tabela 6.1 – Erro médio, desvio padrão e erro <i>RMS</i> para cada modelo de predição	45
Tabela 6.2 – Erro médio, desvio padrão e erro <i>RMS</i> para cada modelo de predição otimizado .....	47
Tabela 6.3 – Erro médio, desvio padrão e erro <i>RMS</i> para o modelo proposto .....	48
Tabela 6.4 – Desempenho dos modelos de perda de propagação .....	48

# LISTA DE SÍMBOLOS

---

$\Delta L_f$	Fator de correção de frequência
$\Delta L_h$	Fator de correção para altura de recepção
$A$	Perda no espaço livre
$A_{bm}$	Perda de percurso média
$A_e$	Abertura efetiva da antena
$A_{fs}$	Atenuação no espaço livre
$c$	Velocidade da luz
$d$	Distância entre transmissor e receptor
$D$	Maior dimensão linear da antena
$d_0$	Distância referencial
$d_f$	Distância de <i>Fraunhofer</i>
$E(d,t)$	Intensidade de campo elétrico
$E_0$	Intensidade de campo elétrico no espaço livre
$E_g$	Intensidade de campo elétrico (Raio refletido)
$E_{LOS}$	Intensidade de campo elétrico (Raio direto)
$E_{TOT}$	Intensidade total do campo elétrico
$f$	Frequência da portadora
$f(i)$	Função de <i>fitness</i>
$F(v)$	Integral complexa de Fresnel
$G_b$	Fator de ganho pela altura da antena transmissora
$G_d$	Ganho de difração
$G_r$	Ganho adimensional da antena receptora
$G_r$	Fator de ganho pela altura da antena receptora
$G_t$	Ganho adimensional da antena transmissora
$h_r$	Altura da antena receptora
$h_t$	Altura da antena transmissora
$k$	Constante relacionada a $E_0$
$L$	Perdas ôhmicas de descasamento de polarização e desalinhamento das antenas
$P_{cross}$	Probabilidade de <i>crossover</i>

$p_i$	Probabilidade que um indivíduo $i$ tem de ser escolhido
$PL$	Perda de propagação
$P_{mut}$	Probabilidade de mutação
$P_r$	Potencia recebida no espaço livre
$P_t$	Potencia transmitida
$S$	Efeito de sombreamento
$t$	Tempo
$v$	Parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff
$\gamma$	Expoente de perda de propagação
$\Gamma$	Coeficiente de reflexão
$\lambda$	Comprimento de onda
$\pi$	Número Pi
$\omega$	Frequência angular

# LISTA DE ABREVIATURAS

---

<b>1 G</b>	1rd Generation Mobile Communication System
<b>2 G</b>	2rd Generation Mobile Communication System
<b>2.5 G</b>	2.5rd Generation Mobile Communication System
<b>3 G</b>	3rd Generation mobile Communication System
<b>3.5 G</b>	3.5rd Generation Mobile Communication System
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>AAS</b>	Adaptive Antenna System
<b>AG's</b>	Algoritmos Genéticos
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone Service
<b>ANATEL</b>	Agência Nacional de Telecomunicações
<b>AP</b>	Access Point
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>DL</b>	Downlink
<b>EDGE</b>	Enhanced Data rates for GSM Evolution
<b>ERB</b>	Estação Rádio Base
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
<b>FM</b>	Frequency Modulation
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Services
<b>GPS</b>	Global Position System
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>GTD</b>	Teoria Geométrica da Difração
<b>HSCSD</b>	High Speed Circuit Switched Data
<b>HSDPA</b>	High Speed Downlink Package Access
<b>HSPA</b>	High Speed Package Access
<b>HSUPA</b>	High Speed Uplink Package Access
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IMT 2000</b>	International Mobile Communication System for year 2000
<b>INCT/CSF</b>	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações Sem Fio
<b>IS-136</b>	Interim Standard – 136



<b>IS-95</b>	Interim Standard – 95
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Telephony
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>P2P</b>	Peer – to – Peer
<b>PDC</b>	Pacific Digital Cellular
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization
<b>RF</b>	Rádio Frequência
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>SUI</b>	Stanford University Interim
<b>TACS</b>	Total Access Communications System
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>UFRN</b>	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
<b>UL</b>	Uplink
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UTD</b>	Teoria Uniforme da Difração
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>WMAN</b>	Wireless Metropolitan Network
<b>xDSL</b>	Digital Subscriber Line

# CAPÍTULO 1

## Introdução

---

O setor de telecomunicações vem passando por grandes transformações, devido ao aumento da busca por acesso a serviços digitais de transmissão de dados, vídeo e multimídia, especialmente, por meio das redes de telefonia móvel. As comunicações móveis proporcionam aos usuários a possibilidade de um contato constante com os demais, disponibilizando facilidades e comodidades como: o acesso rápido a informações e às novas formas de relação pessoal e profissional. Há algum tempo, em alguns países, e mais recentemente no Brasil, as operadoras de telefonia móvel vêm atualizando suas redes para sistemas de terceira geração (3G), proporcionando aos usuários serviços em banda larga como: vídeo conferência, Internet e Tv digital, dentre outros.

Essas novas redes, que proporcionam mobilidade e elevadas taxas de transmissão, tem permitido o desenvolvimento de novos conceitos de mercado, disponibilizando vários serviços em apenas um único aparelho, além de proporcionar oportunidades significativas para regiões que não possuem sistemas cabeados para a prestação de serviços de banda larga, em razão de inviabilidade técnica e financeira. Para que os sistemas de comunicações sem fio sejam implementados com eficiência, muitos esforços têm sido investidos na tentativa de desenvolvimentos de métodos de simulação de predição de cobertura, que se aproximem da realidade o melhor possível de forma a que se possam tornar ferramentas fiéis e indispensáveis no planejamento dos sistemas de comunicações sem fio.

### 1.1 - Evolução Tecnológica

Os sistemas de telefonia móvel vêm evoluindo bastante ao longo dos tempos, conforme as necessidades dos usuários. A primeira geração (1G) começou a operar no início dos anos 80, e tornam-se difundida amplamente no início dos anos 90. Esta geração tinha como características a transmissão analógica, o serviço de voz, a

transmissão de dados a baixíssimas taxas, usadas apenas nos canais de controle das estações rádio base (ERB), a utilização de modulação em frequência (FM), técnicas de acesso FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), pouca privacidade e alto consumo de bateria. O AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), o TACS (*Total Access Communications System*), NMT (*Nordic Mobile Telephony*) e o PDC (*Pacific Digital Cellular*) são alguns exemplos de sistemas analógicos. A incompatibilidade entre os padrões, juntamente com o rápido aumento do número de usuários, foram os principais motivos para a sua evolução ainda na década de 80 [1]. O advento da tecnologia digital provocou o surgimento dos novos padrões, chamados de segunda geração (2G). Estes têm como principais características a utilização das técnicas de múltiplo acesso TDMA (*Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*), que permitem maior capacidade de transmissão de dados, podendo chegar a 19,2 kbps, além de mais facilidades em termos de *roaming* e sinalização.

Serviços básicos de dados como o SMS (*Short Message Service*) e o *imode* também são algumas características dessa geração. Os principais sistemas pertencentes a essa geração são: GSM (*Global System for Mobile Communications*), PDC (*Personal Digital Cellular*), IS-136 e IS-95, sendo que, dentre eles, o GSM teve maior aceitação no mercado mundial. Com o rápido crescimento da demanda por serviços de dados nos sistemas celulares, houve a necessidade da evolução da (2G) para (2,5), com a implementação de alguns serviços de banda larga como, por exemplo, o serviço de dados por pacotes. Os principais sistemas desenvolvidos para esta geração intermediária são o GPRS (*General Packet Radio Services*), com taxas de transmissão até 48 kbps; HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*) e o EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), com taxas de transmissão de até 384 kbps. A migração para o sistema de terceira geração (3G) possibilitou a implementação de serviços avançados IP, multimídia, Internet, taxas de bits acima de 2Mbps, *Handovers* entre 2G e 3G e menor consumo de baterias, dentre outros.

O UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) e o cdma2000x1 são alguns dos sistemas da terceira geração. Com o passar dos anos, a necessidade de disponibilizar novos serviços de dados de alta capacidade como: jogos em tempo real, aplicações *Peer-to-Peer* (P2P) e vídeo telefonia foi surgindo, assim como o aprimoramento de novas tecnologias concorrentes para o acesso banda larga sem fios, o que impulsionou a necessidade da

evolução do WCDMA, por meio da expansão da capacidade do *uplink* (UL) e do *downlink* (DL).

Neste sentido, foram propostos pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) os padrões HSDPA (*High Speed Downlink Package Access*) e o HSUPA (*High Speed Uplink Package Access*) publicados nos *Release 5* e *Release 6*, respectivamente. Esses são os padrões da geração intermediária, chamada 3.5G, que juntos, são chamados “HSPA” (*High Speed Package Access*).

No *Release 7* é apresentado o padrão HSPA *Evolution* o qual é uma evolução do HSPA [1]-[2]. Dentre os padrões da família IMT 2000 (*International Mobile Communication System for year 2000*), destaca-se o mais recente: o “IMT-2000 OFDMA TDD WMAN”, baseado no padrão 802.16 do IEEE (*Institute of Eletrical and Eletronics Engineers*), popularmente conhecido como “WiMAX”.

O padrão WiMAX proporciona conectividade em qualquer lugar, a qualquer instante, por meio da utilização de técnicas como: Modulação Adaptativa, Sistema de Antenas Adaptativas (AAS) e o acesso múltiplo OFDMA, que permite a alocação dos sinais muito próximos uns dos outros no canal sem fio, melhorando significativamente a capacidade do sistema. Além disso, o WiMAX é apontado como solução para o problema da última milha nas atuais redes fixas e móveis, sendo uma alternativa às soluções como: o xDSL (*Digital Subscriber Line*) e o *CableModem*, disponibilizando acessos banda larga sem fio com elevadas taxas de dados, que podem chegar a valores entre 75 e 100 *Mbps*. As especificações técnicas e padronizações dessas tecnologias e de outras elaboradas pelo grupo 3GPP estão ainda em constante desenvolvimento, como é o caso do padrão LTE (*Long-Term Evolution*), apresentada no *Release 8*, que dará suporte a taxas de transmissão mais elevadas, com uma eficiência espectral de três a quatro vezes maior do que as apresentadas nos *Releases 5* e 6 [3].

Atualmente, o mercado está voltado para a expansão da tecnologia WiMAX, esta vêm ganhando cada vez mais o mercado das comunicações móveis de voz e de dados. Em algumas regiões do mundo a instalação e a comercialização do WiMAX encontram-se em fase avançada. Hoje, existem aproximadamente 3,5 milhões de usuários da tecnologia WiMAX no mundo inteiro.

No Brasil, o interesse comercial nesta tecnologia é evidenciado com a primeira outorga de licenças em 3,5 GHz. Em fevereiro de 2003, a ANATEL realizou a licitação 003/2002/SPV-ANATEL, na qual ofereceu blocos de frequência em 3,5 GHz. As operadoras que adquiriram os blocos de frequência foram: Embratel, Brasil Telecom

(Vant), Grupo Sinos, Neovia e WKVE, cada uma com operações distribuídas em algumas regiões do Brasil. O governo brasileiro vem incentivando, desde 2005, projetos relacionados às redes WiMAX com foco social, dentro do conceito de cidades digitais [4].

## **1.2 - Objetivos da Dissertação**

Este trabalho se propõe a realizar campanha de medições de campo, para caracterização do canal de radio-propagação em 3,5GHz, no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, ambiente suburbano arborizado e com construções de médio porte; fazer comparações dos modelos empíricos SUI e ECC-33 com as medidas realizadas no campus da UFRN e realizar otimização dos modelos, na tentativa de minimizar o erro entre os modelos e os valores medidos. Também é proposto um modelo de predição para o ambiente em estudo baseado no modelo SUI e no modelo proposto em [5].

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 - Organização da Dissertação**

No capítulo 2, são apresentados conceitos relativos aos fenômenos básicos de propagação, assim como os mecanismos de propagação ponto-a-ponto que servem de referência para interpretação dos modelos ponto-área utilizada nos sistemas de comunicações sem fio.

No capítulo 3, o objetivo é mostrar as classificações dos modelos de predição de perda de propagação, assim como a classificação e descrição dos tipos de ambientes. Por fim, são apresentados os modelos utilizados para o desenvolvimento desta dissertação.

No capítulo 4, são apresentados diversos aspectos relativos aos AGs. É mostrado também um breve histórico, a analogia com a natureza e sua estrutura de funcionamento.

No capítulo 5, é apresentado o *set-up* utilizado nas campanhas de medições.

O capítulo 6 tem como objetivo mostrar as comparações e os resultados obtidos dos modelos otimizados pelo algoritmo genético com os valores medidos no campus da UFRN, assim como, mostrar o modelo proposto e seu resultado.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e propostas de continuidade deste trabalho.

# CAPÍTULO 2

## Canal de Rádio Propagação

---

### 2.1 – Introdução

O canal de rádio propagação proporciona limitações para o desempenho dos sistemas de comunicações sem fio. Devido a essas limitações de natureza aleatória e da dependência das faixas de frequências utilizadas, o estudo do canal de rádio propagação se torna de difícil análise. A modelagem do canal de rádio-propagação tem sido, historicamente, uma das etapas mais complexas do projeto de um sistema de comunicação sem fio.

### 2.2 – Conceitos Básicos

Nos sistemas de comunicações sem fio *outdoor* a predição das perdas de propagação se torna bastante difícil e complexa, devido às diferentes características observadas no ambiente encontrado entre o transmissor e o receptor, tais como: diferentes estruturas arquitetônicas, arborização variada, diferentes tipos de relevo, além dos fenômenos básicos de propagação que as ondas eletromagnéticas estão sujeitas, como: difração, reflexão e espalhamento.

A difração é o fenômeno responsável por explicar a existência de campos eletromagnéticos em regiões de não visibilidade causadas por obstáculos, regiões essas conhecidas como regiões de sombreamento. Tais obstáculos encontrados pelas ondas eletromagnéticas podem ser naturais ou artificiais em ambiente urbano, suburbano ou rural. Matematicamente, o cálculo para avaliar a atenuação por difração é complexo, fazendo-se necessário a utilização de uma formulação matemática baseada na óptica geométrica, denominada Teoria Geométrica da Difração (GTD) e de sua extensão à Teoria Uniforme da Difração (UTD) [6].

Reflexão é o fenômeno que ocorre quando a onda eletromagnética incide em uma superfície que separa dois meios, com dimensões bem maiores que o comprimento de onda, da onda que se propaga. Parte da energia desta onda é refletida, e a outra parte é transmitida, penetrando no outro meio. As parcelas correspondentes às energias transmitidas e refletidas são calculadas através dos coeficientes de transmissão e reflexão, respectivamente. Os coeficientes de transmissão e reflexão dependem da permissividade elétrica, permeabilidade magnética e condutividade dos meios em que se propagam, além da frequência e do ângulo de incidência sobre o meio em questão. Para a análise desse fenômeno é utilizada a teoria dos raios da óptica geométrica.

O espalhamento ocorre quando o meio de propagação é constituído de objetos com dimensões pequenas (superfícies rugosas, pequenos objetos), em relação ao comprimento de onda [7]. Esses fenômenos citados estão representados na Figura 2.1.

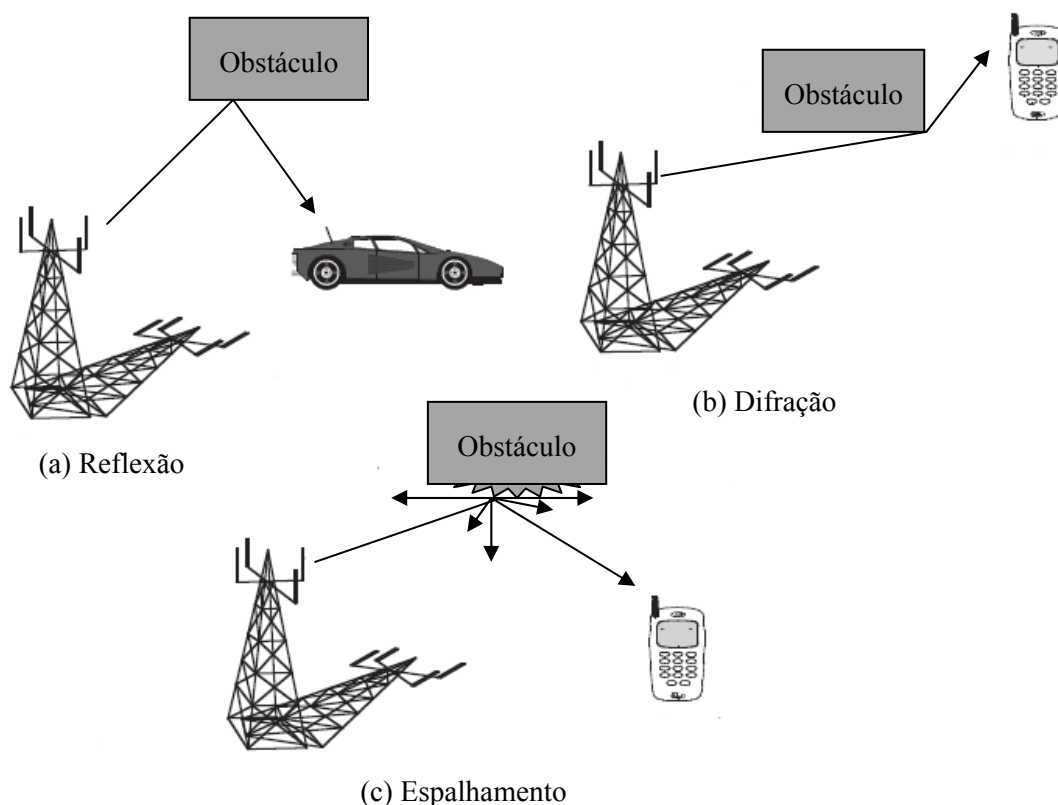


Figura 2.1 – Fenômenos básicos de propagação das ondas eletromagnéticas: a) Reflexão  
b) Difração e c) Espalhamento

Outros efeitos de propagação de grande importância são o de multipercurso e o de sombreamento. O efeito de multipercurso é caracterizado pelo sinal recebido ser a



composição de inúmeras versões do sinal original transmitido, que percorre diferentes caminhos. Em grande parte são gerados pelas múltiplas difrações e reflexões que o sinal original sofre até chegar ao receptor. Já o sombreamento se manifesta através da flutuação do nível de sinal com a distância, devido às obstruções apresentadas pelo relevo ou pelo homem. As flutuações responsáveis por reduzirem o nível do sinal recebido abaixo do seu valor mediano para uma determinada distância do transmissor é o que chamamos de desvanecimento, classificados em três tipos.

O desvanecimento espacial, é caracterizado por uma variação de intensidade em função da distância, e apresenta duas versões que são ilustradas na Figura 2.2: o desvanecimento lento (média do conjunto das flutuações do sinal) e o desvanecimento rápido (variação em torno do valor médio).

O desvanecimento temporal, também denominado de faixa estreita, corresponde às flutuações decorrentes de causas diversas, principalmente com os movimentos do receptor e de objetos na vizinhança. Também influem nesse caso as mudanças de temperatura, umidade relativa, abertura e fechamento de portas.

O desvanecimento seletivo é causado principalmente pela ocorrência de propagação com multipercurso [8].

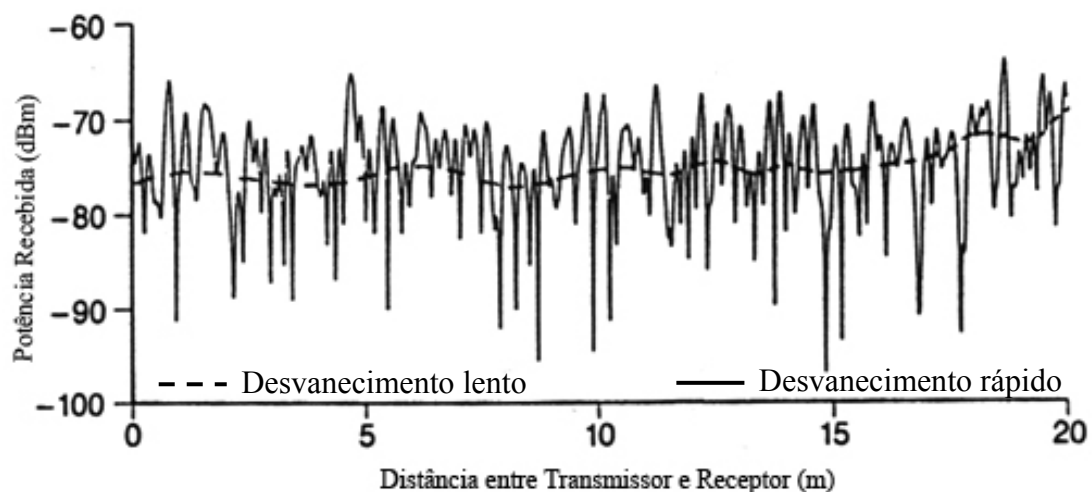


Figura 2.2 – Desvanecimento lento e rápido.

## 2.3 – Propagação no Espaço Livre

É considerada propagação no espaço livre apenas os casos em que o transmissor e o receptor estão localizados livres de qualquer obstrução no caminho direto entre eles,

ou seja, o volume contido no primeiro elipsóide de Fresnel não possui nenhum obstáculo, como ilustrado na Figura 2.3.

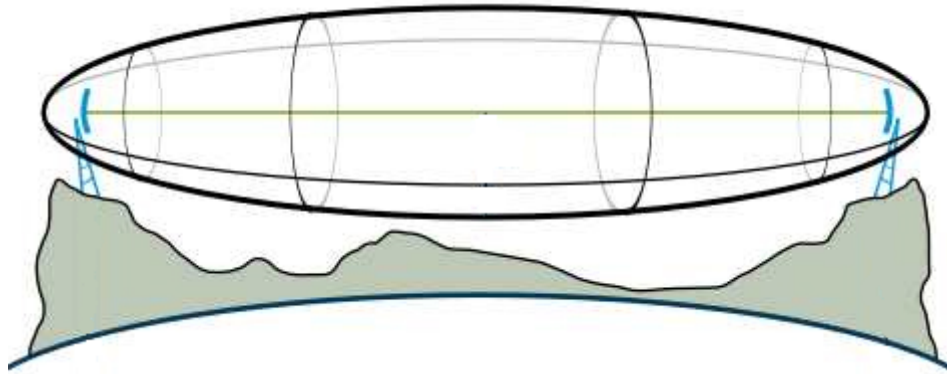


Figura 2.3 – Propagação no espaço livre

Como na maioria dos modelos de predição em larga escala, ele prediz a potência recebida em função da distância entre o transmissor e o receptor, elevada a uma determinada potência. A potência recebida no espaço livre é dada pela equação de Friis [9],

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

onde  $P_r$  é a potência recebida,  $G_t$  e  $G_r$  são, respectivamente, os ganhos adimensionais das antenas transmissora e receptora;  $d$  (m) é a distância entre as antenas transmissora e receptora e  $L$  ( $L \geq 1$ ) corresponde às perdas ôhmicas, de descasamento, de polarização e desalinhamento das antenas;  $\lambda$  é o comprimento de onda (m) [8].

O ganho de uma antena está diretamente relacionado à sua,  $A_e$ , e é dado por,

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.2)$$

A abertura efetiva da antena,  $A_e$ , está relacionada aos aspectos físicos da antena, como o comprimento de onda  $\lambda$  está relacionado com a frequência da portadora, através de:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (2.3)$$

onde  $f$  é a frequência da portadora em *Hertz*;  $\omega_c$  é a frequência angular em radianos por segundo da portadora e  $c$  é a velocidade da luz dada em (m/s).

A perda de propagação para o modelo do espaço livre é dada por,

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[ \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2.4)$$

onde,  $G_t$  e  $G_r$  são, respectivamente, os ganhos das antenas transmissora e receptora;  $d$  (m) é a distância entre as antenas transmissora e receptora e  $\lambda$  (m) é o comprimento de onda. A equação da perda na propagação pode, ou não, incluir os ganhos das antenas receptora e transmissora [9].

A equação 2.4 só é válida para valores de  $d$  que correspondem a pontos localizados na região determinada de campo distante.

O campo distante ou região de *Fraunhofer* de uma antena transmissora é definida como a região além da distância superior à distância de *Fraunhofer* ( $d_f$ ) [9],

$$d_f > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.5)$$

onde  $D$  é a maior dimensão linear física da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda. Para estar localizado numa região de campo distante,  $d_f$  deve satisfazer as seguintes condições,

$$d_f \gg D \quad (2.6)$$

$$d_f \gg \lambda \quad (2.7)$$

Considerado unitário o ganho das antenas transmissora e receptora na equação (2.4), e fazendo as alterações necessárias nas unidades da distância e frequência para *km* e *GHz* respectivamente, obtemos a equação (2.11) :

$$PL(dB) = -10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$PL(dB) = -20 \log \left( \frac{c}{f} \right) + 20 \log(4\pi d) \quad (2.9)$$

$$PL(dB) = -20 \log(c) + 20 \log(f) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(d) \quad (2.10)$$

$$PL = 92,44 + 20 \log(f[GHz]) + 20 \log(d[km]) \quad (2.11)$$

onde,  $PL$  é a perda de propagação em  $dB$ ,  $d$  a distância em  $km$  e  $f_c$  é a frequência da portadora em  $GHz$ .

## 2.4 - Modelo de Reflexão no Solo com Dois Raios

O modelo de reflexão no solo com dois raios, mostrado na Figura 2.4, é um modelo de propagação útil, baseado na ótica geométrica. Este considera um caminho direto e um caminho refletido no solo entre o transmissor e o receptor. Esse modelo foi considerado razoavelmente preciso para prever a intensidade do sinal em larga escala, no caso de distâncias de vários quilômetros, em sistemas de rádio móvel que utilizam torres altas (alturas que ultrapassam 50 m), além de canais de microcélula de linha de visada em ambientes urbanos [9].

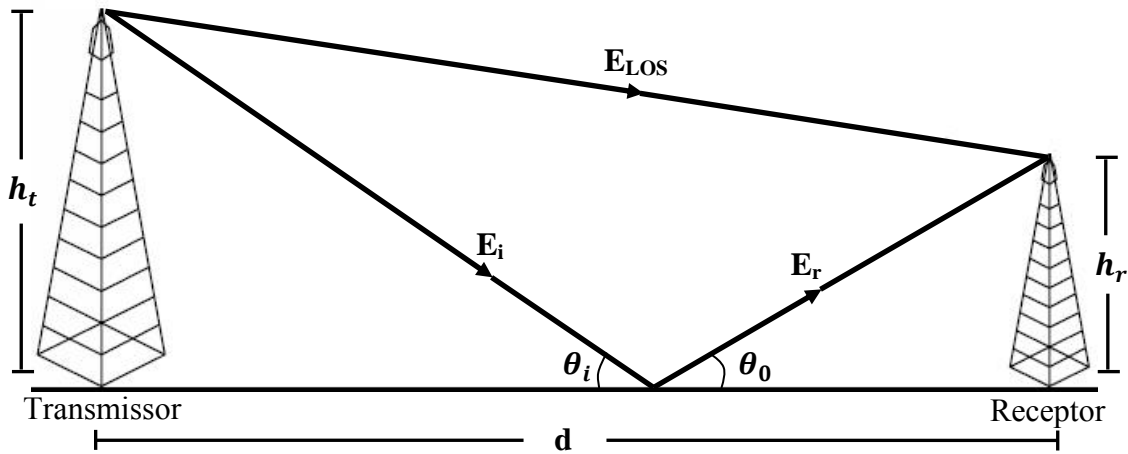


Figura 2.4 - Modelo de reflexão no solo com dois raios.

A concepção de cálculo da atenuação do sinal de rádio frequência (RF), pelo método dos dois raios, parte da avaliação da intensidade de campo elétrico com base na Figura 2.4. A intensidade de campo elétrico ( $V/m$ ), na condição de espaço livre, a uma distância  $d$  ( $m$ ) do transmissor é dada por [8]:

$$E(d, t) = \frac{E_0 d_0}{d} \cos \left( \omega_c \left( t - \frac{d}{c} \right) \right) \quad (2.12)$$

onde,  $E_0$  é a intensidade do campo elétrico no espaço livre ( $V/m$ ),  $d_0$  é distância referencial do transmissor ( $m$ ),  $\frac{E_0 d_0}{d}$  representa o módulo do campo elétrico  $E(d, t)$  a uma distância  $d$  ( $m$ ) do transmissor,  $t$  representa o tempo ( $s$ ),  $\omega_c$  é a frequência da portadora ( $rad/s$ ) e  $c$  é a velocidade da luz ( $m/s$ ). As expressões de intensidade de campo elétrico provenientes do raio direto e do raio refletido são respectivamente:

$$E_{LOS}(d', t) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos \left( \omega_c \left( t - \frac{d'}{c} \right) \right) \quad (2.13)$$

$$E_g(d'', t) = \frac{E_0 d_0}{d''} \cos \left( \omega_c \left( t - \frac{d''}{c} \right) \right) \quad (2.14)$$

onde,  $\Gamma$  é o coeficiente de reflexão para o solo, o qual assume um valor de  $\Gamma = -1$  para o caso em que haja reflexão perfeita. A intensidade total do campo elétrico  $E_{TOT}$ , no receptor, será a soma vetorial da componente direta com a refletida.

$$|E_{TOT}| = |E_{LOS}| + |E_g| \quad (2.15)$$

Utilizando-se a óptica geométrica a partir do método das imagens ilustrado pela Figura 2.5, evoluindo a expressão de intensidade de campo total e fazendo simplificações a partir das considerações angulares, obtemos:

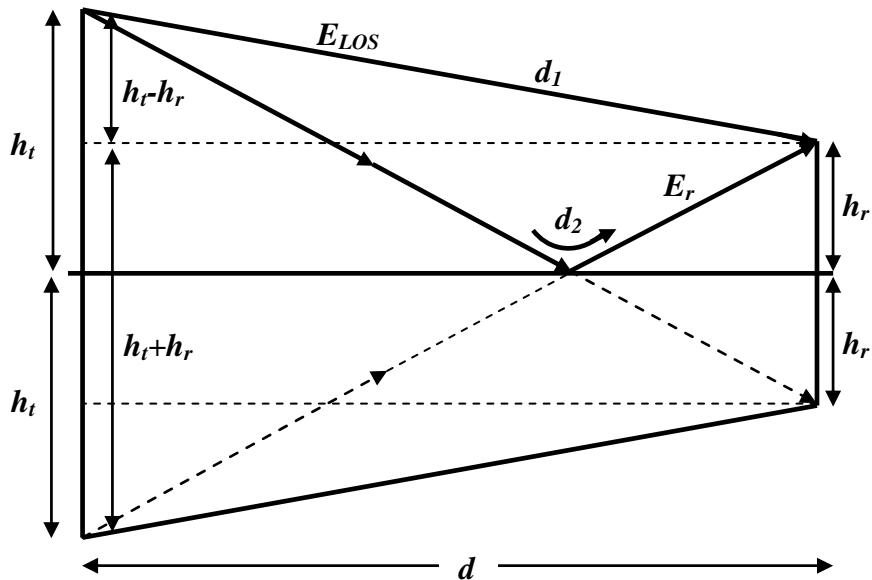


Figura 2.5 – Método das imagens.

$$E_{TOT}(d) = \frac{2E_0 d_0}{d} \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \approx \frac{k}{d^2} \quad (2.16)$$

onde,  $k$  é uma constante relacionada a  $E_0$ , às alturas da antena receptora e transmissora e ao comprimento de onda  $\lambda$  (m).

A potência recebida no espaço livre, a uma distância  $d$ , está relacionada ao quadrado do campo elétrico através de:

$$P_r = P_d A_e = \frac{|E|^2}{120\pi} A_e = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} = \frac{|E|^2 G_r \lambda^2}{480\pi^2} \quad (2.17)$$

Combinando as equações (2.2), (2.16) e (2.17), a potência recebida a uma distância  $d$  do transmissor, para o modelo de reflexão no solo com dois raios, pode ser expressa como:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2.18)$$

A perda de propagação entre o transmissor e o receptor, para o modelo de reflexão no solo com dois raios, pode ser expressa em  $dB$  como:

$$PL(dB) = 40 \log(d) - [10 \log(G_t) - 10 \log(G_r) + 20 \log(h_t) + 20 \log(h_r)] \quad (2.19)$$

## 2.5 - Modelo de Difração de Gume de Faca

A difração pode ser explicada através do princípio de *Huygens*. Este estabelece que todos os pontos em uma frente de onda funcionam como fontes pontuais para a produção de ondas secundárias. Essas ondas secundárias se combinarão para produzir uma nova frente de onda na direção de propagação [9]. Normalmente, o cálculo com precisão da atenuação por difração, especialmente em áreas densamente urbanas, é matematicamente difícil, em função da complexidade e irregularidade dos terrenos e das construções. Quando o sombreamento é causado por um único objeto, a atenuação provocada pela difração pode ser estimada, tratando-se da obstrução como uma difração do tipo gume de faca. A perda por difração pode ser prontamente estimada usando a

solução de *Fresnel*, clássica para o campo, atrás de um gume de faca. A Figura 2.6 ilustra essa técnica.

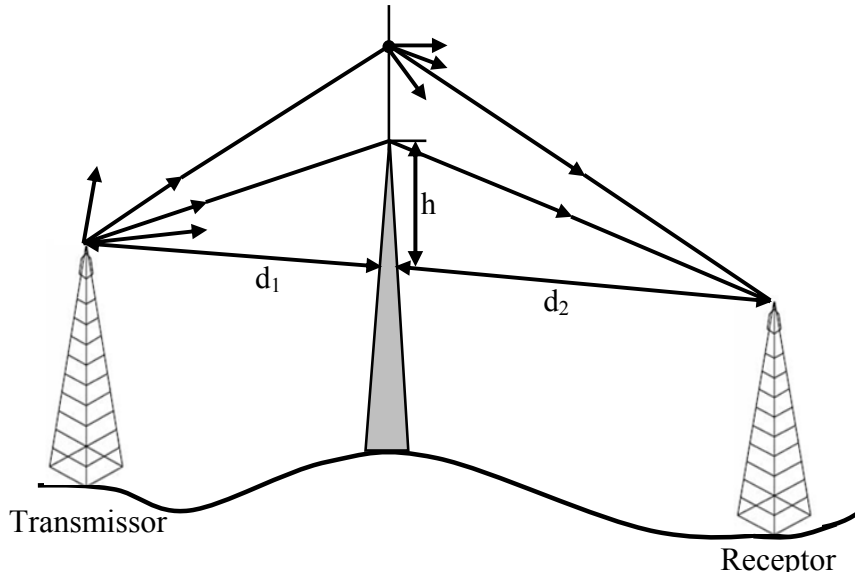


Figura 2.6 – Gume de faca.

A intensidade do campo, para um receptor localizado na região sombreada Figura 2.6, é determinada pela soma de todas as fontes secundárias de *Huygens*, no plano acima do gume de faca, e é expressa por:

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^{\infty} \exp\left(\frac{-j\pi t^2}{2}\right) dt \quad (2.20)$$

onde,  $E_0$  é a intensidade de campo no espaço livre na ausência do solo e do gume de faca e  $F(v)$  é a *integral complexa de Fresnel*. A integral de Fresnel,  $F(v)$ , é uma função do parâmetro de difração de *Fresnel-Kirchoff* ( $v$ ), definida por:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad (2.21)$$

O ganho de difração, devido à presença de um gume de faca, em comparação com o campo  $E$  no espaço livre, é dado por:

$$G_d(\text{dB}) = 20 \log |F(v)| \quad (2.22)$$

Na Figura 2.7 pode-se observar uma representação gráfica de  $G_d(dB)$  em função de  $v$ . Uma solução aproximada para a equação (2.22) é fornecida por Lee e expressa pelas seguintes expressões [9]:

$$G_d(dB) = 0 \quad v \leq -1 \quad (2.23)$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0,5 - 0,62v) \quad -1 \leq v \leq 0 \quad (2.24)$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0,5 \exp(-0,95v)) \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (2.25)$$

$$G_d(dB) = 20 \log\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2}\right) \quad 1 \leq v \leq 2,4 \quad (2.26)$$

$$G_d(dB) = 20 \log\left(\frac{0,225}{v}\right) \quad v > 2,4 \quad (2.27)$$

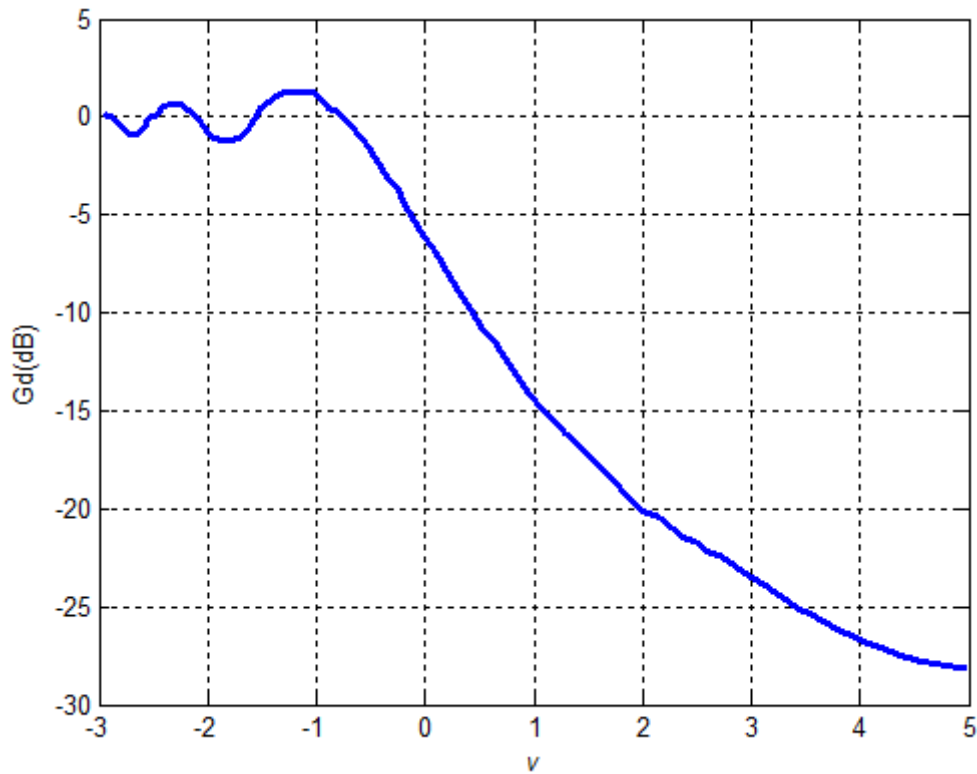


Figura 2.7 - Representação gráfica de  $G_d(dB)$  em função de  $v$



## **2.6 – Considerações Finais**

Neste capítulo, foram descritos os fenômenos básicos de propagação, assim como os mecanismos de propagação ponto-a-ponto, que servem de referência para interpretação dos modelos ponto-área utilizada nos sistemas de comunicações sem fio.

# CAPÍTULO 3

## Predição de Perda de Propagação

---

### 3.1 – Introdução

Nos sistemas de comunicações sem fio a predição das perdas de propagação é de grande complexidade, devido às grandes diferenças de ambientes. Para os cálculos de atenuação em enlaces de sistemas de comunicações sem fio são utilizados modelos de predição de perda de propagação, que na maioria fornecem o valor médio do sinal no receptor. A estimativa correta e o desenvolvimento de modelos implicam na necessidade de se conhecer todos os fatores que influenciam a propagação do sinal nos sistemas de comunicações sem fio.

### 3.2 - Classificação dos Modelos de Perda de Propagação

Os modelos de predição de perda de propagação são classificados em teóricos, empíricos e híbridos. Os modelos teóricos necessitam da utilização de bases de dados topográficos. Não levam em consideração todos os fatores de ambiente em que o móvel se desloca, além de permitirem uma fácil alteração de parâmetros.

Os modelos empíricos são baseados em medidas, e conduzem a relações simples entre a atenuação e a distância. Levam em consideração todos os fatores que afetam a propagação do sinal. Tem-se a necessidade da validação para locais, frequências e condições de diferentes dos ambientes de medida.

Os modelos híbridos contemplam as perspectivas empíricas e teóricas. Estes modelos possuem alguma flexibilidade, podendo ser comparados com medidas reais realizadas nos ambientes de propagação, específicos onde vão ser utilizados, possibilitando assim, minimizar o erro entre a estimação do sinal previsto pelo modelo de propagação e a posterior realidade, quando da implementação física dos (*access points*

- APs) [7]-[8]. A utilização de modelos na qual a aplicação de uma componente empírica necessita da classificação de ambientes.

### **3.3 - Classificação de Ambientes**

No estudo da propagação do sinal nas comunicações sem fio, uma classificação dos ambientes em estudo torna-se necessária. Esta classificação leva em consideração algumas características do ambiente em questão, tais como: ondulação do terreno, densidade da vegetação, altura e localização das edificações, existência de áreas abertas, existência de superfícies aquáticas, entre outras. A partir do estudo dessas características, os ambientes podem ser classificados em áreas: densamente urbanas, urbanas, suburbanas e rurais [7]-[10].

As áreas densamente urbanas são aquelas em que há predomínio de conglomerados de altos edifícios residenciais e comerciais e uma elevada densidade demográfica. As áreas urbanas são normalmente definidas como áreas que possuem edifícios de médio porte distribuídos aleatoriamente e com elevada densidade demográfica.

As áreas suburbanas são compostas por casa residenciais e com média densidade de vegetação e população. As áreas rurais são aquelas que possuem poucas construções e alta densidade de vegetação. Para que não haja diferentes interpretações, por diferentes usuários com relação a estas classificações de ambientes, tem-se a necessidade de uma descrição minuciosa do ambiente tanto qualitativamente, quanto quantitativamente, para que não surjam ambiguidades nas classificações, devido às possíveis diferenças culturais.

### **3.4 - Modelos de Predição da Perda de Propagação**

Os modelos de predição da perda de propagação exercem um papel fundamental no planejamento de sistema de rede sem fio, já que é um dos fatores que determina o sinal de cobertura. É de grande importância que estes modelos de propagação se aproximem da realidade o melhor possível, de forma que possam tornar-se ferramentas fiéis e indispensáveis ao planejamento de uma rede de comunicações móveis. Um

grande número de modelos de predição de perda de propagação é encontrado na literatura. Dentre os mais tradicionais estão:

- i. Okumura;
- ii. Hata;
- iii. COST 231;
- iv. Lee;
- v. COST 231 Walfish-Ikegami

O modelo de Okumura é baseado em medições feitas em Tóquio, em 1960, entre 200 MHz e 1920 MHz. Este modelo é empírico, baseando-se apenas nos dados medidos. O modelo de Hata é uma formulação empírica que incorpora as informações gráficas do modelo de Okumura, e é válido para frequências entre 150 MHz e 1500 MHz [11]. O modelo COST 231 é uma versão melhorada do modelo de Hata, e é válido para frequências entre 1500 MHz e 2000 MHz. O modelo de Lee foi originalmente desenvolvido para uso em 900 MHz e tem dois modos: área-a-área e ponto-a-ponto. O modelo de Lee é um modelo pela lei de potência com fatores de correção para a altura da antena e frequência. O modelo COST 231 Walfish-Ikegami, por sua vez, foi desenvolvido a partir dos modelos de Walfish-Bertoni e Ikegami, e leva em consideração a morfologia detalhada do terreno, como informações de altura de prédios, distância entre prédios e largura média das ruas. É válido para frequências compreendidas entre 800 MHz e 2000 MHz [12]. Tendo em vista que trabalharemos nesta dissertação com a frequência de 3,5 GHz não serão utilizados estes modelos tradicionais, devido a suas limitações quanto a frequência. Os modelos que serão utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, serão os modelos SUI e ECC-33 que serão expostos nos próximos tópicos.

### **3.4.1 - Modelo Stanford University Interim (SUI)**

O modelo SUI, adotado pelo IEEE para redes WMAN no padrão 802.16, baseia-se no modelo Erceg [13] e é classificado em 3 tipos de ambiente denominados de A, B e C. O tipo A é associado à máxima perda de percurso e é apropriada para regiões de relevo bastante acidentado com densidade de moderada a intensa de vegetação. O tipo C é

apropriado para regiões de perda de percurso mínima, onde o terreno é plano, e possui uma densidade de vegetação leve. O tipo B é o tipo de terreno intermediário a A e C. Inicialmente, o modelo SUI foi desenvolvido para frequências próximas de 2 GHz. Para superar essas limitações, foi desenvolvida uma versão aproximada que é apresentada na equação (3.1) [7] - [14]:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta L_f + \Delta L_h + S \quad (3.1)$$

onde,

$$A = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (3.2)$$

$$\gamma = a - b h_t + \left(\frac{c}{h_t}\right) \quad (3.4)$$

$$\Delta L_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (3.5)$$

$$\Delta L_h = -10,8 \log\left(\frac{h_r}{2}\right), \text{ para terrenos do tipo A e B} \quad (3.6)$$

$$\Delta L_h = -20 \log\left(\frac{h_r}{2}\right), \text{ para terreno do tipo C} \quad (3.7)$$

sendo  $f$  a frequência de operação (MHz);  $d_0$  a distância de referência, ( $d_0=100$  m);  $d$  a distância entre a estação rádio base e o receptor, (m);  $h_t$  é a altura da antena da estação rádio base, (m);  $h_r$  é a altura da antena do receptor, (m) e  $\lambda$  é o comprimento de onda, (m). O efeito de sombreamento,  $S$ , é modelado como sendo uma variável aleatória log-normal, de desvio padrão típico entre 8,2 e 10,6 dB [13]. O modelo SUI estendido é válido para:  $2 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$ ,  $10 \text{ m} \leq h_t \leq 80 \text{ m}$  e  $1,9 \text{ GHz} \leq f \leq 3,5 \text{ GHz}$ . Com base na Tabela 3.1, é possível calcular um expoente de perda de propagação,  $\gamma$ , para cada tipo de terreno do modelo SUI. A Figura 3.1 mostra o cálculo do expoente de propagação para os três tipos de terrenos do modelo SUI.

Tabela 3.1 - Parâmetros do modelo SUI

Parâmetros	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

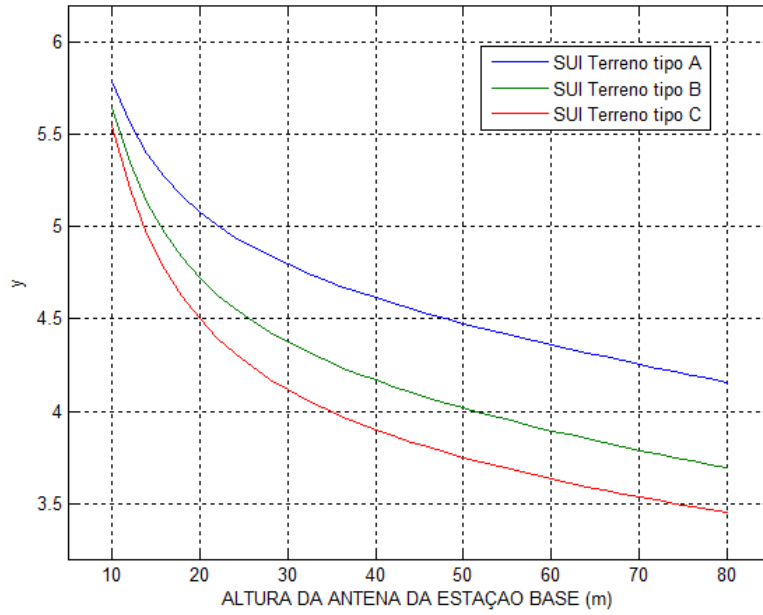


Figura 3.1 - Expoente de perda de propagação para os tipos de terrenos do modelo SUI.

### 3.4.2 - 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 porte e cidades de médio porte, com fatores de correção para áreas suburbanas ou abertas, de modo que o modelo seja aplicável à faixa de 3,4 a 3,8 GHz [14] e [15]. A perda de percurso para o modelo ECC-33, em dB, é dada por:

$$PL_{ECC} = A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \quad (3.8)$$

$$A_{fs} = 92,4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (3.9)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,83\log(d) + 7,894\log(f) + 9,56[\log(f)]^2 \quad (3.10)$$

$$G_b = \log(h_t/200)\{13,958 + 5,8[\log(d)]^2\} \quad (3.11)$$

onde  $A_{fs}$  é a atenuação no espaço livre, (dB);  $A_{bm}$  a perda de percurso média, (dB); dependente da distância,  $d$  (km); e da frequência de operação  $f$ , (GHz).  $G_b$  é o fator de ganho pela altura da estação rádio base, (dB), dependente da  $h_i$ ;  $G_r$  é o fator de ganho pela  $h_r$ . Para cidades de médio porte:

$$G_r = [42,57 + 13,7\log(f)][\log(h_r) - 0,585] \quad (3.12)$$

e para cidades de grande porte [16]:

$$G_r = 0,795(h_r) - 1,862 \quad (3.13)$$

### 3.5 – Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as classificações dos modelos de predição de perda de propagação, assim como a classificação e descrição dos tipos de ambientes. Por fim, foram apresentados os modelos que serão utilizados no desenvolvimento desta dissertação.

# CAPÍTULO 4

## Algoritmos Genéticos

---

### 4.1 – Introdução

A otimização refere-se ao conjunto de procedimentos para maximizar ou minimizar, dependendo do objetivo, uma função, almejando-se dessa forma a melhor solução para o problema. Muitos problemas têm métodos eficazes determinísticos, sejam eles analíticos, numéricos ou enumerativos, mas eles podem falhar, quando não há linearidade, ruído, descontinuidade, vários objetos de otimização ou vastos espaços de busca. Para estes casos, os métodos estocásticos mostram ser ferramentas poderosas, nos quais se destacam os algoritmos genéticos AG's, que, baseados nos conceitos da evolução e seleção natural, utilizam métodos probabilísticos, exploram espaços de buscas de grandes dimensões e manipulam um grande número de restrições.

### 4.2 – Breve Histórico dos Algoritmos Genéticos

Até o século XIX, os cientistas acreditavam em uma dentre as teorias do criacionismo ou da geração espontânea. Por volta de 1850 *Charles Darwin* fez uma longa viagem no navio HMS *Beagle*, onde pôde visitar vários lugares e, com isso, observar várias espécies de animais. *Darwin*, então, percebeu que animais da mesma espécie eram ligeiramente diferentes dos seus parentes em outro ecossistema, sendo mais bem adaptados às necessidades que aquele ambiente proporcionava. Todas as observações que *Darwin* fez durante sua viagem a bordo do *Beagle* culminaram na teoria da evolução das espécies, que foi publicada em seu livro em 1859: *A Origem das Espécies* [17]. A teoria da evolução, formulada por *Charles Darwin*, combina os conceitos de genética e seleção natural. A genética natural está ligada a diversidade entre indivíduos de uma população. Esta diversidade é produzida pela combinação e inserção ou alteração de material genético do indivíduo. Já o princípio da seleção



natural privilegia os indivíduos mais aptos, os quais possuem mais chance de perpetuarem suas características genéticas para as próximas gerações.

Na metade do século passado, a teoria da evolução de Darwin começou a ser assimilada por diversas áreas, inclusive a de Ciências Exatas. No Final da década de 60, *John Holland* começou a desenvolver as bases de algoritmos genéticos (AG's). Seu trabalho resultou, em 1975, na publicação do seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [18], o qual introduziu os algoritmos genéticos como uma técnica de otimização através de simulações de metáforas genéticas. Mais adiante em 1989, *David E. Goldberg*, discípulo de *Holland*, descreveu, com mais detalhes, a metodologia utilizada nos algoritmos genéticos em seu livro intitulado *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* [19]. Após as publicações de *Holland* e *Goldberg*, muito se evoluiu em relação aos algoritmos genéticos, principalmente na questão de suas aplicações nas mais diversas áreas (música, telecomunicações, elétrica, medicina, robótica, entre outras) e no melhoramento de sua eficiência.

### 4.3 - Conceito, Estrutura e Funcionamento dos Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos genéticos são métodos computacionais de busca e otimização estocástico fundamentados nos mecanismo de evolução e seleção natural. Os AG's são considerados otimizadores estocásticos, pois utilizam operadores probabilísticos, concebidos a partir de metáforas biológicas.

Por serem uma metáfora biológica os AG's utilizam muitos conceitos e terminologias da biologia e genética, mas nem sempre seguem fielmente em termos de definição. A Tabela 4.1 mostra algumas definições de termos que serão utilizados ao longo desta dissertação.

Tabela 4.1 - Termologias utilizada nos Algoritmos Genéticos

Termo	Definição
Gene	Variáveis de otimização que se apresentam de forma codificada;
Cromossomo	Conjunto ordenado de genes que caracteriza um único indivíduo. Possível solução para o problema;
População Inicial	Conjunto de indivíduos criados aleatoriamente utilizados como base para o processo de busca;

<b>Gerações</b>	Populações criadas a partir da população inicial e das gerações anteriores através dos operadores genéticos;
<b>Função de <i>Fitness</i></b>	Função utilizada para calcular a aptidão que um indivíduo tem como solução do problema;
<b>Pais</b>	Indivíduos da atual população que foram escolhidos para o processo de <i>crossover</i> ;
<b>Filhos</b>	Indivíduos da próxima geração que foram gerados pelo processo de <i>crossover</i> ;

Devido à sua versatilidade, os AG's não possuem um modelo fixo. Entretanto, eles possuem um sequência de execução semelhante. Um fluxograma básico de execução de um AG é apresentado na Figura 4.1.

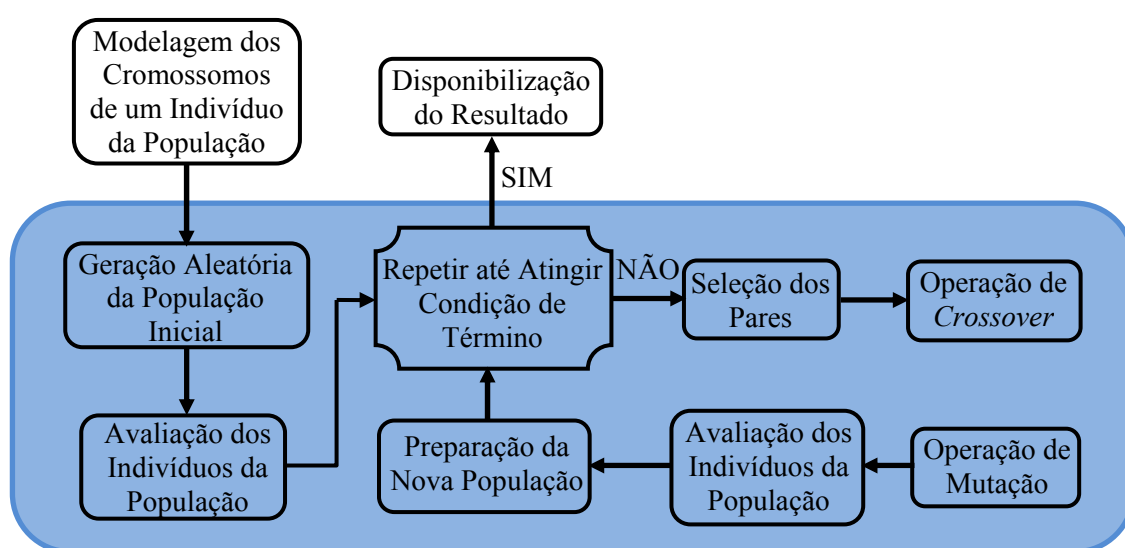


Figura 4.1 - Fluxograma básico de um algoritmo genético.

O procedimento de inicialização e execução de um algoritmo genético consiste, inicialmente, em gerar aleatoriamente uma população, a qual é composta pelos parâmetros a serem otimizados. Em seguida essa população é avaliada por uma função de *fitness*, que é responsável por atribuir um valor numérico para cada indivíduo da população, medindo, assim, a potencialidade que cada indivíduo tem para solucionar o problema. Após a primeira avaliação, se houver algum indivíduo que satisfaça a solução do problema, o algoritmo é encerrado, caso não aja, o algoritmo entra em um processo iterativo, onde pares de indivíduos são selecionados e passam por operadores genéticos (*crossover* e mutação). Depois da utilização dos operadores genéticos, os novos indivíduos formados são inseridos na população inicial. Essa nova população passa novamente pela avaliação se houver algum indivíduo que satisfaça o problema, o

algoritmo é encerrado, caso não aja, o algoritmo continua no laço até a obtenção da convergência. Os tipos de codificações, os métodos de seleção, os operadores genéticos, função de *fitness* e convergência serão mostrados com mais detalhes nas seções seguintes.

#### **4.3.1 – Inicialização**

A inicialização da população geralmente é feita da forma mais simples possível, podendo ser gerada de forma aleatória ou heurística, ou seja, com base no conhecimento prévio do problema. Normalmente as populações costumam ter tamanho fixo, as quais devem ser o maior possível. Para algoritmos lentos, é comum ter populações pequenas e/ou geradas de modo heurístico, objetivando uma diversidade genética, mesmo com poucos indivíduos [20]. A diversidade genética é uma característica importante do AG, o que possibilita uma maior exploração paralela possível do espaço de busca, que é uma vantagem do AG sobre os métodos convencionais, que normalmente exploram uma possível solução por vez.

#### **4.3.2 – Avaliação**

Cada indivíduo da população pode ser uma possível solução para o problema em questão e deve-se avaliar a aptidão de cada um desses indivíduos para a resolução do problema. A função de avaliação ou função de *fitness* é a maneira utilizada para determinar a aptidão que um indivíduo tem como solução do problema em questão. A função de *fitness* calcula então um valor numérico que reflete quão bons os parâmetros representados no cromossomo resolvem o problema. Isto é, ela usa todos os valores armazenados no cromossomo e retorna um valor numérico, cujo significado é uma métrica da qualidade da solução obtida usando-se aqueles parâmetros [17]. A função de *fitness* deve ser bem escolhida, para que se obtenha um resultado esperado para a resolução do problema.

### 4.3.3 – Codificações de Variáveis

A escolha do tipo de codificação a ser utilizada pelo algoritmo genético é um dos primeiros passos para o seu desenvolvimento. Uma escolha inadequada pode levar a uma não convergência do algoritmo genético. Existem basicamente três tipos de codificações de variáveis utilizadas com mais frequência nos algoritmos genéticos, são: Codificação Binária, Codificação Gray e a Codificação Real.

#### 4.3.3.1 – Codificação Binária

A codificação binária é a codificação clássica do algoritmo genético devido a sua analogia direta com a genética natural, tornando-a, dessa forma, uma das mais utilizadas. A representação das variáveis do problema por esta codificação é feita utilizando apenas 0's e 1's. Um indivíduo utilizado codificação binária pode ser representado da seguinte forma:

$$W = [00110 \ 11111 \ \dots \ W_n]$$

onde,  $W_n$  representa um gene (uma variável da solução). A codificação binária é mais comum ser utilizada para problemas com variáveis discretas [21].

O uso da codificação binária pode gerar alguns problemas, como vetores bastante extensos para obter uma alta precisão na representação dos indivíduos. Outro problema é conhecido como *Hamming cliffs*, que são grandes diferenças nas cadeias de bits que codificam dois números inteiros adjacentes. Este problema enfatiza-se quando, por exemplo, se realiza uma perturbação nos bits mais significativos da variável. Esta perturbação pode causar um grande deslocamento no espaço de busca, o que nem sempre é desejado [20].

#### 4.3.3.2 – Codificação Gray

Uma alternativa da codificação binária é a codificação Gray, pois minimiza o efeito *Hamming cliffs*. Como na codificação binária, a codificação Gray utiliza-se apenas de 0's e 1's para representar as variáveis. A diferença está na facilidade de

operação, devido à propriedade de semelhança existente na codificação, que representa números inteiros adjacentes. Isso pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Comparação entre a Codificação Binária e a Codificação Gray.

Números Decimais	0	1	2	3	4	5	6	7
Codificação Binária	0	1	10	11	100	101	110	111
Codificação Gray	0	1	11	10	110	111	101	100

Com a utilização do código Gray, uma pequena taxa de perturbação ajuda na convergência final dos AGs, enquanto que, no binário, poderia ampliar a região de exploração [22].

#### 4.3.3.3 – Codificação Real

A utilização da codificação real torna-se mais prático, quando se trabalha com variáveis reais por natureza e se usa uma linguagem de programação que lida diretamente com números reais [22]. Dependendo do problema a ser otimizado, a codificação real pode reduzir a complexidade computacional, pois não há transformação decimal – binário – decimal, além de ajudar a minimizar o fenômeno *Hamming cliffs* [20]. Em [23], *Haupt L. R.* e *Haupt E. S* mostram que a codificação real é mais rápida e eficaz, e que possui resultados mais consistentes ao longo de varias simulações. Entretanto, tal codificação torna os métodos de troca de informações genéticas mais complexas. Um indivíduo utilizando codificação real pode ser representado da seguinte forma:

$$R = [1,234 \ 9,7 \ \dots \ R_n]$$

onde,  $R_n$  representa um gene (uma variável da solução).

#### 4.3.4 - Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são responsáveis por transformar a população através de sucessivas gerações, na tentativa de melhorar a aptidão de cada indivíduo. Os operadores genéticos são métodos probabilísticos baseados na genética e são necessários para manter a diversidade e perpetuar características importantes adquiridas pelas gerações anteriores. Na literatura são encontrados vários tipos de operadores

genéticos, sendo que, boa parte, específicos para determinados problemas e codificações. Alguns operadores são genéricos e mais utilizados como é o caso da seleção, *crossover* e da mutação.

#### **4.3.4.1 – Seleção**

Depois de decidir qual tipo de codificação será utilizada, a próxima etapa é decidir como fazer a seleção, ou seja, como selecionar os indivíduos da população que irá criar a prole para a próxima geração. O tipo seleção é responsável por desempenhar a função da seleção natural na evolução, selecionando para sobreviver e reproduzir os indivíduos melhor adaptados ao meio, neste caso, os indivíduos com melhor valor na função de *fitness*. Contudo, sinaliza-se um problema: qual método deve ser utilizado para selecionar esses indivíduos? Conforme a teoria da evolução de *Darwin*, os indivíduos mais fortes sobrevivem e se reproduzem repassando suas heranças genéticas para as próximas gerações. A seleção é um método que escolhe aleatoriamente os indivíduos da população, de acordo com seu valor de *fitness*. Quanto melhor o valor de *fitness*, mais chance um indivíduo tem de ser selecionado [24]. Porém, a seleção não deve basear-se unicamente na escolha do melhor indivíduo, pois há chances deste não estar localizado perto da solução ótima global. Desta forma, deve-se manter alguma probabilidade de que indivíduos com *fitness* mais baixos entrem no processo de reprodução [22]. Existem muitos métodos para fazer a seleção. Os mais utilizados são: Roleta, Torneio e Rank.

##### **4.3.4.1.1 – Método da Roleta**

Essa é uma das técnicas mais tradicionais de seleção. Ela emprega o princípio da probabilidade de sobrevivência do melhor indivíduo. Cada indivíduo é representado por uma fatia da roleta. A fatia que cada indivíduo vai receber da roleta está ligada diretamente ao seu valor da função de *fitness*. Indivíduos com maior valor de *fitness* recebem uma proporção maior da roleta, tendo, dessa forma, uma probabilidade maior de ser selecionados. Indivíduos com menor valor de *fitness* recebem uma fatia, menor tendo, dessa forma, uma probabilidade menor de ser selecionados. A Tabela 4.3 apresenta seis indivíduos, seus respectivos *fitness* calculados a partir de uma determinada função e os valores percentuais relativos à soma de todos os valores de

*fitness* da população. Já a Figura 4.2 mostra a distribuição proporcional de cada um desses indivíduos na roleta.

Tabela 4.3 - Método da Roleta.

	<b>Código</b>	<b>Fitness</b>	<b>% População</b>
<b>Indivíduo 1</b>	0,356	15	30,61
<b>Indivíduo 2</b>	1,567	9	18,36
<b>Indivíduo 3</b>	8,387	1,5	3,06
<b>Indivíduo 4</b>	4,854	5	10,23
<b>Indivíduo 5</b>	2	7,5	15,3
<b>Indivíduo 6</b>	0,876	11	22,44

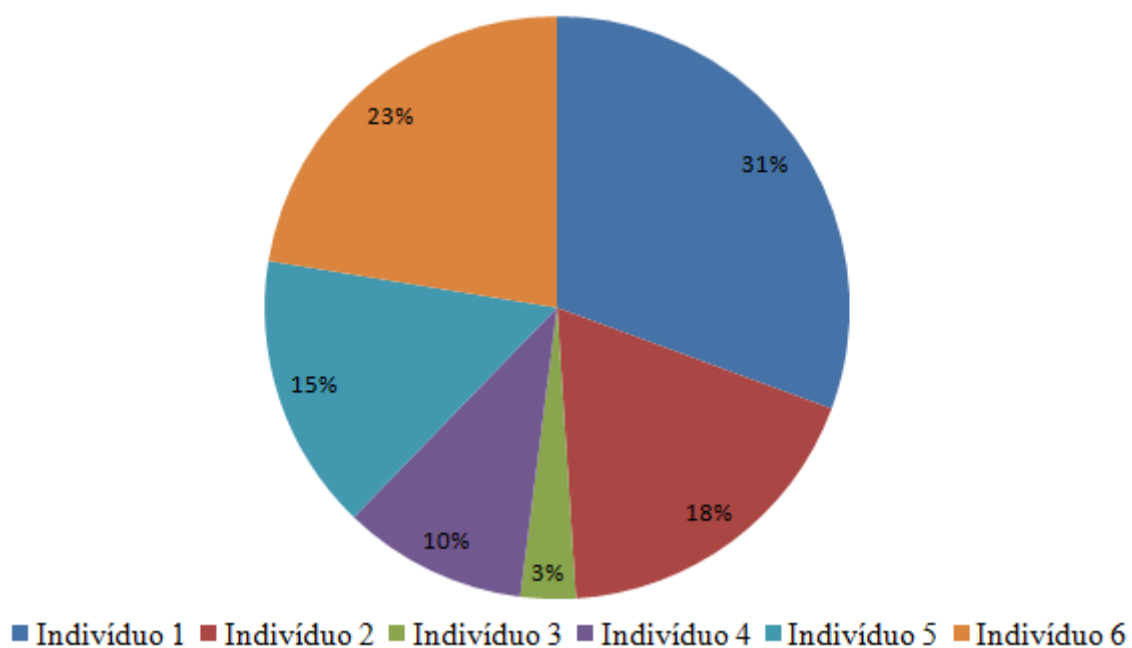


Figura 4.2 - Distribuição dos indivíduos na roleta.

A probabilidade  $p_i$  que um indivíduo  $i$  tem de ser escolhido em função da sua função de fitness  $f(i)$  está expressa pela equação [22]:

$$p_i = \frac{f(i)}{\sum_i f(i)} \quad (4.1)$$

Por esta ser uma técnica probabilística, indivíduos com um fitness melhor podem ser selecionados, assim como indivíduos com fitness mais baixos, proporcionando dessa certa forma, uma variedade genética. A utilização desse método de seleção pode causar uma convergência prematura, devido aos indivíduos que

possuem elevado *fitness* em relação à média, poderem dominar o processo de seleção. Este fato causará, dessa forma, uma pressão seletiva, o que tenderá a diminuir a diversidade genética das próximas populações [22].

#### 4.3.4.1.2 – Método do *Ranking*

A seleção por *ranking* é um método que evita a convergência prematura e a dominância de um super indivíduo. Neste tipo de seleção os indivíduos são ordenados em uma lista, “*ranking*”, de acordo com o valor da função de *fitness*. Este *ranking* é utilizado como base da seleção, ao invés de usar diretamente o valor de *fitness* [17]. Esse método de seleção apresenta algumas vantagens e desvantagens, tais como: redução da pressão seletiva sobre a população no início do processo, onde os valores da função de *fitness* dos indivíduos podem ser muito desiguais uns dos outros, evitando, desse modo; a sua convergência prematura; aumento da pressão seletiva sobre a população no final do processo, onde os valores da função de *fitness* dos indivíduos são, geralmente, muito próximos um dos outros, elevando a velocidade de convergência.

A principal desvantagem é o tempo gasto no processamento do algoritmo a cada geração, para ordenar os indivíduos segundo o valor de *fitness* [25].

#### 4.3.4.1.3 - Método do Torneio

O método de seleção do torneio consiste em selecionar vários indivíduos, aleatoriamente, da população e fazer com que eles entrem em competição pelo direito de participar dos operadores genéticos, utilizando, como critério de força, seu valor de *fitness*. Neste método de seleção, é definida a quantidade de indivíduos que serão selecionados para competir entre si, através de um parâmetro denominado tamanho do torneio  $k$  [17]. O valor usual de  $k$  é igual a 2, pois do contrário não haverá competição. Elevando-se o valor de  $k$ , aumenta-se a pressão de seleção, isto é, indivíduos com valor de *fitness* acima da média terão mais chances de serem selecionados. A Figura 4.3 representa um exemplo do método de seleção do torneio, o qual possui uma população com oito indivíduos e o tamanho do torneio  $k = 3$ . Neste exemplo, a seleção dos oito indivíduos que formarão a nova população e que irão participar dos operadores genéticos, é feita da seguinte forma: são realizados oito torneios, cada torneio possui três indivíduos que foram selecionados aleatoriamente. Os três indivíduos de cada



torneio irão competir entre si, os que possuírem maior valor de *fitness* serão os vencedores do torneio, formando assim a nova população.

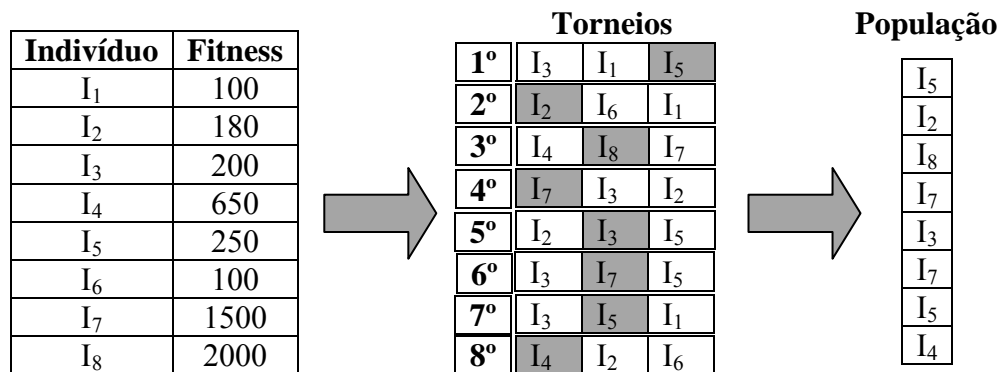


Figura 4.3 – Método do Torneio

#### 4.3.4.2 – Crossover

O *crossover* é um processo sexuado, responsável pela permutação de características entre pares de indivíduos previamente selecionados, originando, dessa forma, dois novos indivíduos. Após ocorrer a seleção dos pares de indivíduos, estes são submetidos ao processo de *crossover*, sendo que este processo poderá, ou não, ocorrer de acordo com uma dada probabilidade de *crossover*  $P_{cross}$ . Esta probabilidade deve ser alta, geralmente entre 0,6 e 0,9 [17]-[25]. Existem várias formas de *crossover*, dentre elas, crossover de um ponto, dois pontos e uniforme.

##### 4.3.4.2.1 – Crossover de Um Ponto

Após selecionar dois indivíduos que serão pais, um ponto de corte é escolhido aleatoriamente. Um ponto de corte constitui uma posição entre genes de um indivíduo. Um indivíduo com  $n$  genes possui  $n-1$  pontos de corte. Depois da seleção do ponto de corte, cada pai é separado em duas partes: uma à esquerda do ponto de corte e outra à direita. A formação dos novos indivíduos se dará pela concatenação dos materiais genéticos separados dos pais. O primeiro filho é composto pela concatenação da parte esquerda do primeiro pai, com a parte direita do segundo pai. O segundo filho é composto através da concatenação da parte direita do primeiro pai com a parte esquerda do segundo pai. Um exemplo deste processo pode ser visto na Figura 4.4.

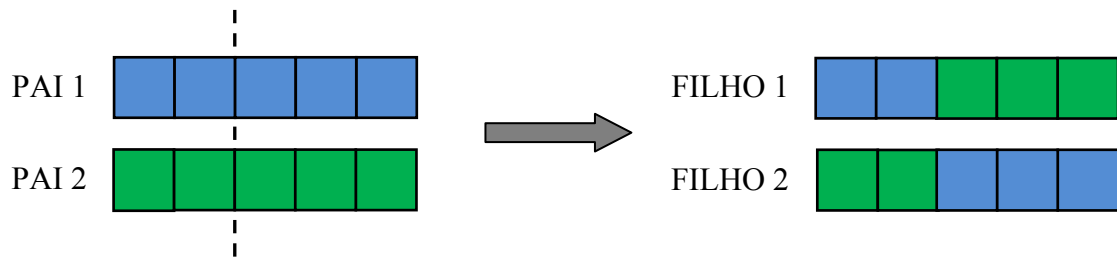


Figura 4.4 - *Crossover* de um ponto

#### 4.3.4.2.2 - *Crossover* de Dois Pontos

O *crossover* de dois pontos é bem parecido com o *crossover* de apenas um ponto. É uma versão mais elaborada no qual ao invés de selecionar um único ponto de corte, é selecionado dois pontos de corte, dividindo o cromossomo em três partes. O processo do *crossover* de dois pontos pode ser visto na Figura 4.5.

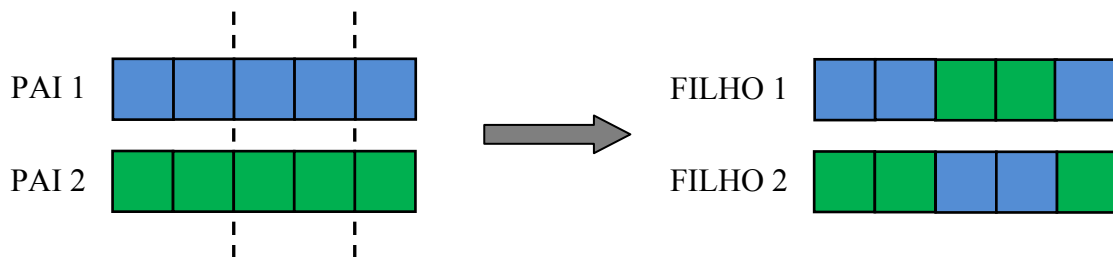


Figura 4.5 - *Crossover* de dois pontos

#### 4.3.4.2.3 - *Crossover* Uniforme

O *crossover* uniforme é realizado da seguinte forma: é gerada aleatoriamente uma cadeia de bits formadas por 0's e 1's que guiará a troca de material genético. Se o valor sorteado for igual a um, o filho número um receberá o gene da posição corrente do primeiro pai, enquanto que o segundo filho o gene corrente do segundo pai. Caso o valor sorteado for zero, o primeiro filho recebe o gene da posição corrente do segundo pai e o segundo filho recebe o gene corrente do primeiro pai. O processo do *crossover* uniforme pode ser visto na Figura 4.6.

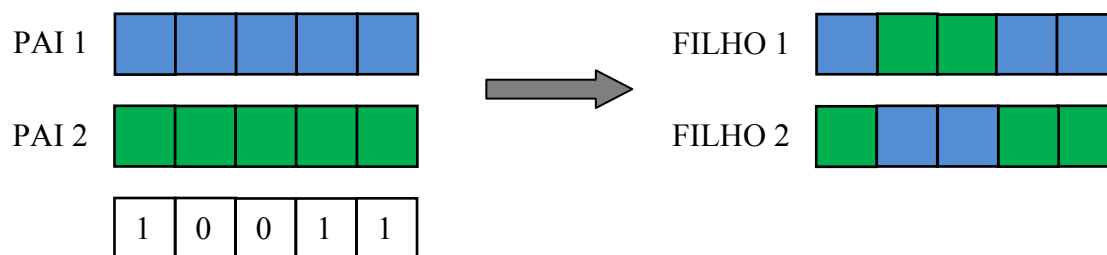


Figura 4.6 - *Crossover* uniforme

#### 4.3.4.3 – Mutação

A mutação é um operador genético simples de ser realizado, é caracterizada pela alteração aleatória do material genético dos indivíduos, ou seja, é escolhido aleatoriamente uma ou mais posições do cromossomo que serão alterados. Da mesma forma que o *crossover*, a mutação poderá ocorrer, ou não, de acordo com uma probabilidade de mutação  $P_{mut}$ . Esta probabilidade geralmente é baixa, entre 0 e 0,1 [26]. O processo do operador de mutação pode ser visto na Figura 4.7.

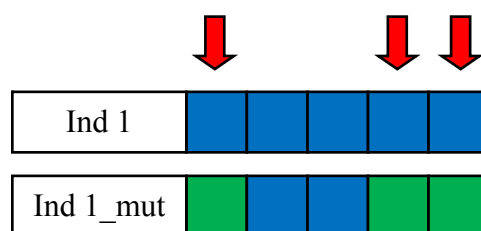


Figura 4.7 - Operado de Mutação

## 4.4 - Critérios de Convergência

A convergência dos algoritmos genéticos é formulada a partir de critérios pré-estabelecidos. Esses critérios devem ser estabelecidos obrigatoriamente, caso não sejam, os AG's podem entrar em laço infinito. Um exemplo de método de convergência pode ser a estipulação de um número máximo de gerações. Esse método pode ocasionar falhas, caso o número máximo de gerações não permita uma busca completa no universo de soluções possíveis. Conhecendo o valor de *fitness* pretendido, pode-se trabalhar com um *fitness* máximo admissível, ou seja, caso os GA's encontrem um cromossomo com um valor de *fitness* menor que o pré-estabelecido, encerra-se o

algoritmo genético. Vários métodos de convergência podem ser utilizados pelos AG's, dependerá do problema que se deseja otimizar.

## **4.5 - Considerações Finais**

Neste capítulo foram apresentados diversos aspectos relativos aos AGs. Foi mostrado um breve histórico, a analogia com a natureza e sua estrutura de funcionamento. Os AG's demonstraram ser uma ferramenta robusta, de fácil entendimento e implementação, além de bastante versáteis, devido a sua fácil adaptação a vários problemas. O fato dos AG's serem métodos estocásticos e trabalharem com operadores probabilísticos, possibilita a exploração de um espaço de busca de grandes dimensões e a manipulação de um grande número de restrições, permitindo-lhes, dessa forma, certa liberdade quanto à escolha da melhor solução.

# CAPÍTULO 5

## *Set-up* de Medições

---

### 5.1 – Introdução

Este capítulo, descreve o *set-up* utilizado nas campanhas de medições. O local escolhido para a instalação do *set-up* de transmissão foi o prédio sede do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações sem fio – INCT-CSF, localizado no campus universitário da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, ambiente considerado suburbano.

### 5.2 - Local das Medições

O local escolhido para a realização das campanhas de medições foi o campus da UFRN, localizado na região sul da cidade de Natal. Como pode-se observar nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, percebe-se a coexistência entre uma densidade média de vegetação e construções de médio porte, caracterizando, dessa forma, o campus da UFRN como suburbano.



Figura 5.1 – Campus da UFRN – I.



Figura 5.2 - Campus da UFRN – II.



Figura 5.3 - Campus da UFRN – III.



Figura 5.4 - Campus da UFRN – IV.

### 5.3 - Set-up de Transmissão

O conjunto transmissor é formado por uma antena omnidirecional, modelo *HG3511U-PRO* da *Hyperlink* de ganho 11 dBi, instalada no prédio do INCT/CSF a uma altura de 15 metros, como mostra a Figura 5.5.



Figura 5.5 - Prédio sede do INCT/CSF – Antena transmissora.

O equipamento utilizado para a transmissão foi um sistema simplex de microondas analógico para TV, composto por um *main frame*, modelo MF-9903, e um transmissor, modelo T3G35P0, ambos cedidos pela Linear Equipamentos Eletrônicos S.A. O sistema é mostrado pela Figura 5.6:



Figura 5.6 - Sistema simplex de microondas analógico para TV.

O cabo utilizado foi o *DLC 213 Premium* do fabricante *DataLink* e os conectores utilizados foram do fabricante *USIVALE*, os quais possuem uma perda por inserção de 0,2 dB máximo em 10 GHz.

Na Figura 5.7 é apresentado o conjunto de transmissão, de forma a calcular a potência isotrópica efetiva radiada, resultante em 45,14 dBm. Quando se trata de cabo coaxial, a atenuação indicada representa a atenuação total do conjunto cabo e conectores.

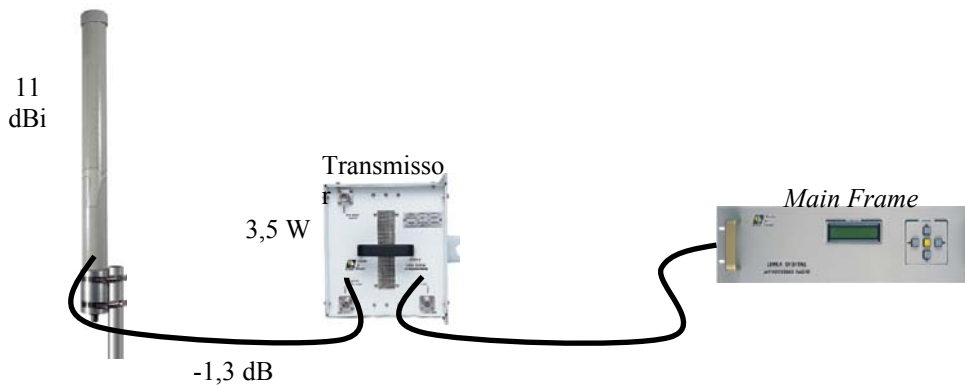


Figura 5.7 - Conjunto de transmissão.

As especificações mais detalhadas da antena transmissora, do sistema simplex de transmissão, dos cabos e conectores podem ser vistos no Apêndice A.

## 5.4 - Set-up de Recepção

Para a recepção do sinal foi utilizado um Analisador de Espectro modelo *FSH6* da *Rohde & Schwarz*, Figura 5.8, o qual foi programado para capturar cem amostras de intensidade de campo e dar a média dessas amostras. Uma antena isotrópica de ganho 0 dB, um tripé regulável e um *GPS (Global Position System)* da marca *GARMIN eTREX* também foram utilizados para a coleta de informações de coordenadas geográficas.



Figura 5.8 - Analisador de Espectro *FSH6*.



Para o processamento dos dados foi utilizado o software Matlab® 7 instalado em um computador portátil da HP, modelo Pavilion dv2850BR, processador Intel Pentium Dual Core 1.73 GHz, 3 GB de memória e 120 GB de disco rígido.

## 5.5 - Campanha de Medições

As campanhas de medições foram realizadas entre os dias 25/02/2010 e 16/03/2010 entre os horários de 8:00 a 10:30 da manhã e 14:30 a 16:30 da tarde. Foram realizadas 229 medidas de intensidade de campo, cada uma com 100 amostras, resultando no total de 22.900 amostras. A Figura 5.9 mostra as rotas das campanhas de medições:

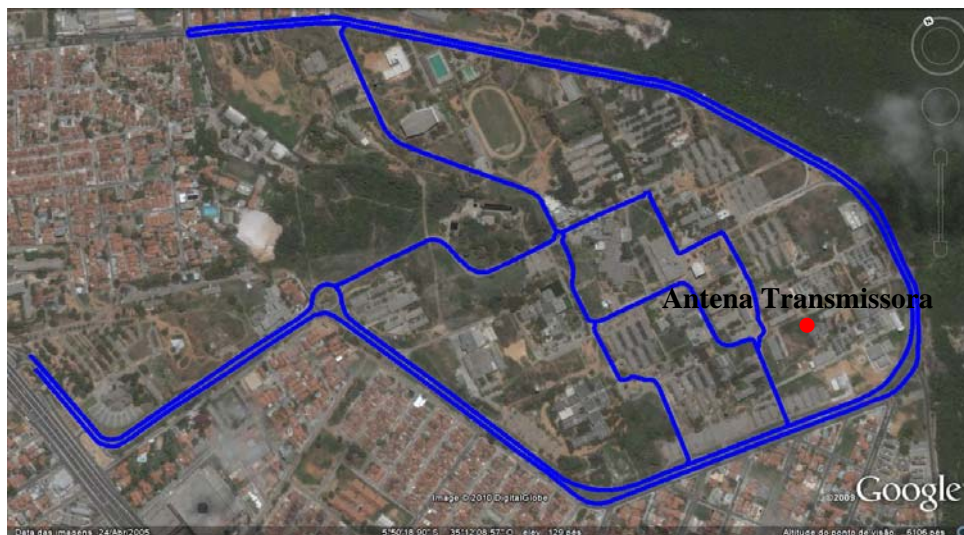


Figura 5.9 - Rotas das medições.

A perda de propagação em cada ponto foi calculada apartir da diferença entre a potência de transmissão (potência isotrópica efetiva radiada) e a potência de recepção de cada ponto da medição.

Na Figura 5.10 são apresentados os resultados medidos de perda média de propagação referente às rotas de medições:

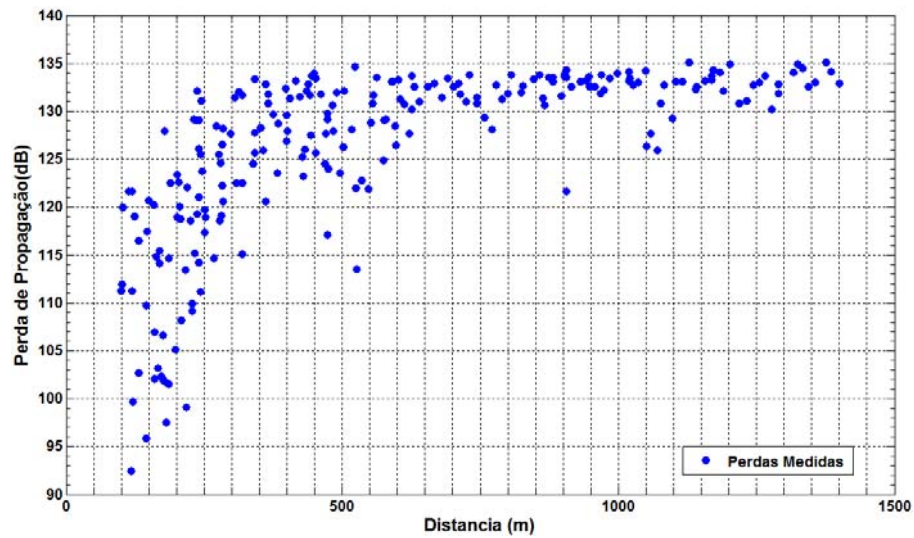


Figura 5.10 - Perda de propagação no campus da UFRN.

## 5.6 - Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia empregada para fazer a campanha de medições. Foram apontados ainda as rotas de medições e o resultado da perda de propagação no campus da UFRN.

# CAPÍTULO 6

## Análise dos Resultados

---

### 6.1 – Introdução

Neste capítulo serão analisados os resultados medidos apresentados no capítulo anterior. Após as comparações entre os modelos SUI e ECC com os valores medidos, foi aplicado aos modelos o algoritmo genético para a otimização dos modelos, minimizando, dessa forma, a diferença entre os valores preditos e medidos. Foi proposto um modelo específico para região em estudo com base no modelo SUI, com referências ao trabalho [5] e otimizado pelo algoritmo genético. De forma a avaliar a diferença entre os valores dos modelos de predição e as medições, foram calculados os valores de erro médio absoluto, desvio padrão do erro e erro RMS.

### 6.2 – Comparações das Medições vs. Modelos

De forma a avaliar a diferença entre os valores dos modelos de predição de perda de propagação e os valores medidos, foram calculados os valores de erro médio absoluto, ( $\mu$ ), desvio padrão, ( $\sigma$ ), e erro médio quadrático, ( $RMS$ ). O erro médio é 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 numero total de medidas.

O desvio padrão, que representa a dispersão estatística entre os valores medidos e calculados, é um indicador da qualidade do modelo, e é dado por:

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

O erro RMS representa conjuntamente o erro médio absoluto e o desvio padrão, dado pela expressão:

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

Os modelos SUI e ECC-33 são de fácil implementação, pois não fazem uso do perfil do terreno em estudo. As Figuras 6.1 e 6.2 mostram uma comparação entre os dados medidos e os modelos SUI e ECC-33, respectivamente.

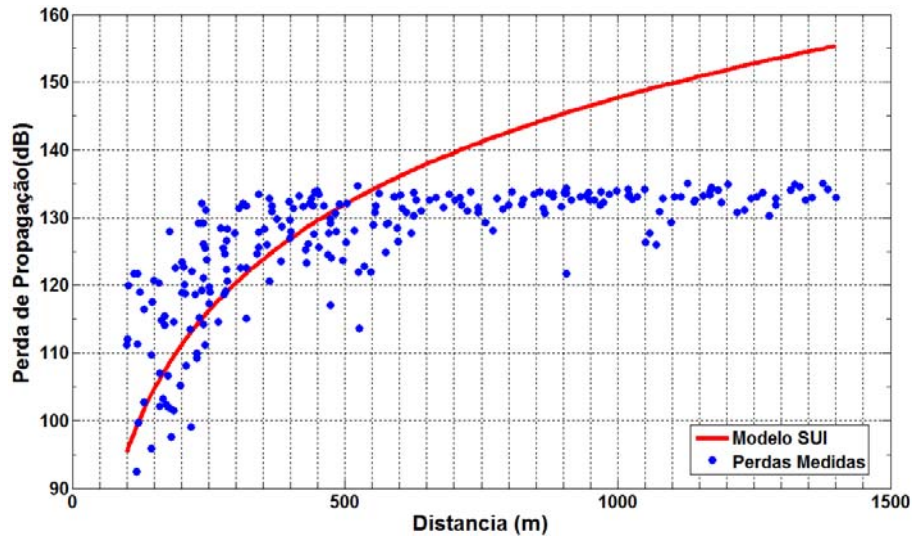


Figura 6.1 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo SUI.

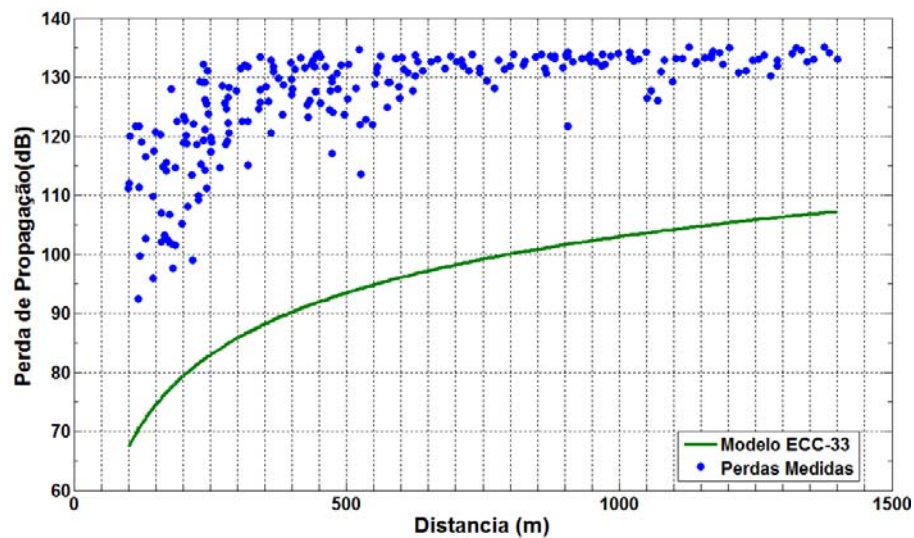


Figura 6.2 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo ECC-33.

Pode-se observar na Figura 6.1, que o modelo *SUI* mostra uma boa aproximação para distâncias abaixo de 500 m, entretanto, para distâncias superiores a 500 m o modelo tende a ser pessimista (maior perda prevista). Já no modelo *ECC-33*, os resultados se mostram otimistas (menor perda prevista), em relação às medições, subestimando, entre 19 e 52 dB, a perda de propagação. A Figura 6.3 mostra a comparação entre os modelos *SUI*, *ECC-33* e os valores medidos.

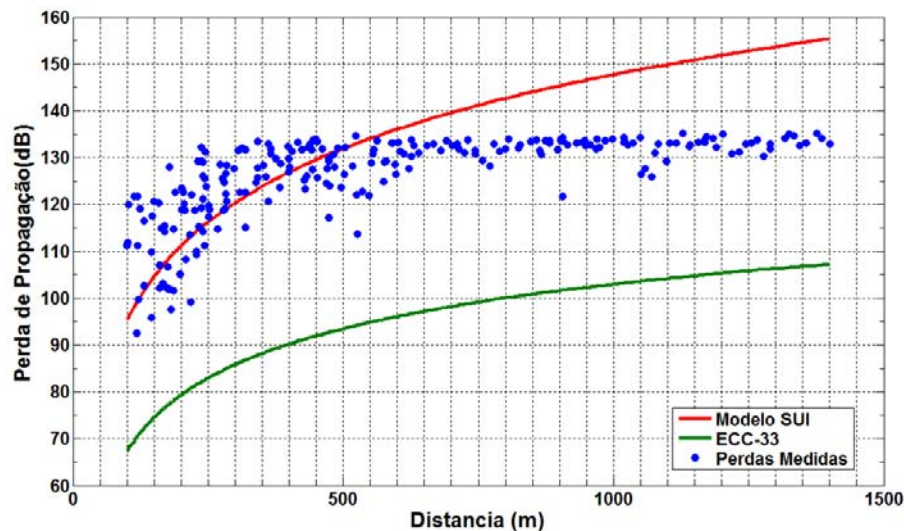


Figura 6.3 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelos *SUI* e *ECC-33*.

A Tabela 6.1 mostra uma comparação entre os valores preditos pelos modelos e os valores obtidos na campanha de medições baseados no erro médio absoluto, desvio padrão e o erro *RMS*.

Tabela 6.1 - Erro médio, desvio padrão e erro *RMS* para cada modelo de predição.

Modelo	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro RMS (dB)
<b>SUI</b>	9,66	11, 61	15, 13
<b>ECC-33</b>	34,13	34,87	48,80

### 6.3 – Otimização dos Modelos *SUI* e *ECC-33*

Para otimização dos modelos *SUI* e *ECC-33* foi desenvolvido um algoritmo genético, responsável por otimizar os parâmetros ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ) e a variável do efeito de sombreamento ( $s$ ) do modelo *SUI*. No modelo *ECC-33* o algoritmo genético foi utilizado na otimização dos fatores de ganho pela altura da antena da estação base e da



antena receptora ( $G_b$  e  $G_r$ ), respectivamente. A função de *fitness* usada para avaliar a aptidão que cada indivíduo tem como solução do problema em questão, é dada por:

$$Fitness = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |PL_i^{Medido} - PL_i^{Simulado}| \quad (6.4)$$

Os resultados dos modelos SUI e ECC-33 otimizados pelo algoritmo genético podem ser vistos nas Figuras 6.4 e 6.5, respectivamente. Podemos observar, em ambas as Figuras, uma melhor aproximação dos modelos de predição dos valores medidos.

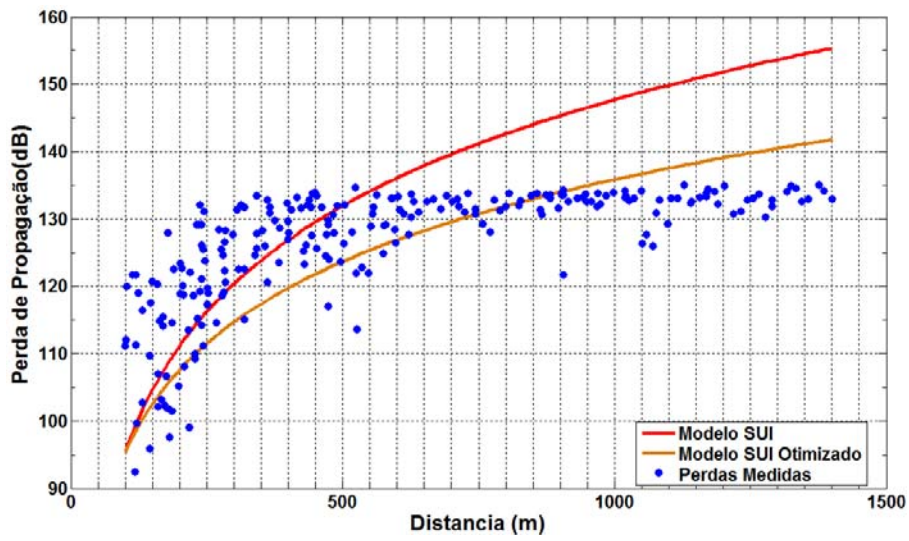


Figura 6.4 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo SUI Otimizado.

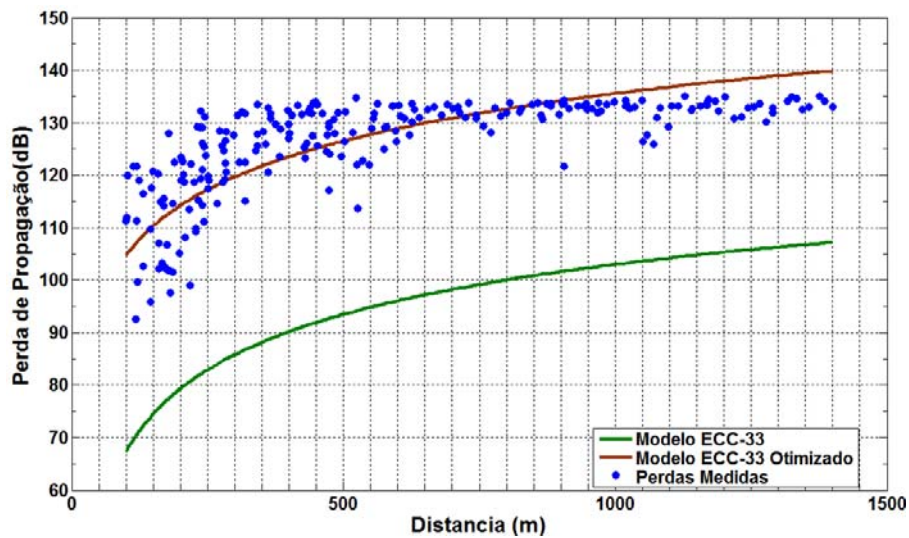


Figura 6.5 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo ECC-33 Otimizado.

A Tabela 6.2 mostra uma análise comparativa entre os valores medidos e os valores preditos pelos modelos otimizados. Pode-se observar na Tabela 6.2, que a utilização do algoritmo genético para otimização dos modelos proporcionou uma redução no erro médio e desvio padrão do modelo SUI, em torno de 2,7 *dB* cada, e de 29 *dB* para o modelo *ECC-33*.

Tabela 6.2 - Erro médio, desvio padrão e erro *RMS* para cada modelo de predição otimizado.

<b>Modelo</b>	<b>Erro Médio (dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>	<b>Erro RMS (dB)</b>
<b>SUI</b>	6,95	8,82	11,23
<b>ECC-33</b>	5,09	6,41	8,18

Tendo como base o modelo SUI e o modelo proposto em [5], representado pela equação:

$$PL = 82,468 + 10 \left( a + bd + \frac{c}{d} \right) \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (6.5)$$

onde, no expoente de perda de propagação, foi introduzida uma dependência com a distância, um novo modelo para o ambiente em estudo foi proposto e otimizado pelo algoritmo genético. O modelo proposto é representado pela seguinte equação:

$$PL_{MOD} = A + 10 \left( a - bd + \frac{c}{d} \right) \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + \Delta L_f + \Delta L_h + S \quad (6.6)$$

A Figura 6.6 mostra o modelo proposto otimizado pelo algoritmo genético. Podemos observar uma boa concordância do modelo proposto com os valores medidos, mostrando, assim, um melhor desempenho se comparados aos outros modelos.

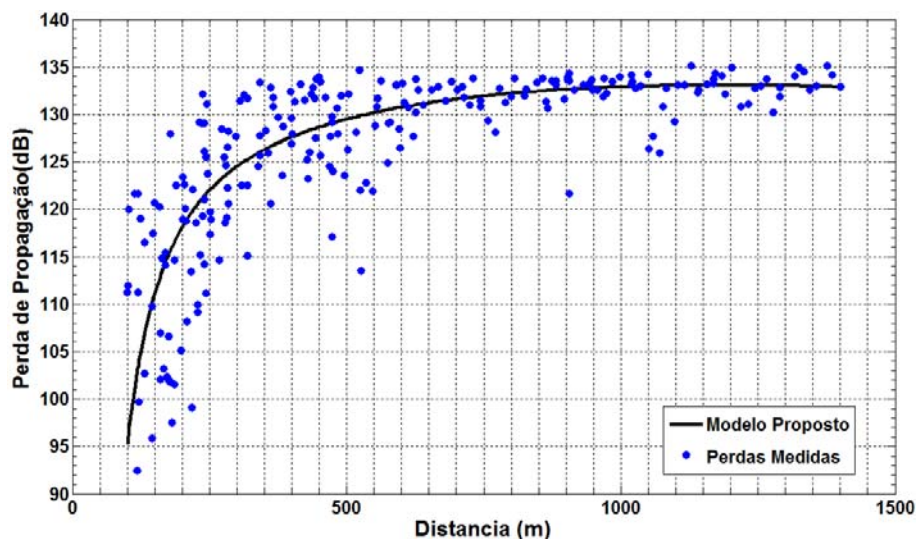


Figura 6.6 – Perda de Propagação: Valores Medidos vs. Modelo Proposto.

A Tabela 6.3 mostra uma análise comparativa entre os valores medidos e os valores preditos pelo modelo proposto otimizado baseado no erro médio absoluto, desvio padrão e o erro *RMS*. Pode-se observar uma redução em relação ao modelo SUI do erro médio em 5,69 *dB* e de 5,62 *dB* para o desvio padrão.

Tabela 6.3 - Erro médio, desvio padrão e erro *RMS* para o modelo proposto.

Modelo	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro RMS (dB)
<b>Modelo Proposto</b>	3,97	5,99	7,19

Para visualizar melhor os resultados obtidos, a Tabela 6.4 mostra o desempenho de cada modelo. Observamos que os modelos otimizados pelos AG's proporcionaram uma redução no erro de predição dos modelos trabalhados nesta dissertação. O modelo proposto conseguiu obter bons resultados, reduzindo mais ainda o erro de predição em relação aos modelos otimizados.

Tabela 6.4 – Desempenho dos modelos de perda de propagação.

Modelo	Erro Médio (dB)	Desvio Padrão (dB)	Erro RMS (dB)
<b>SUI</b>	9,66	11, 61	15, 13
<b>ECC-33</b>	34,13	34,87	48,80
<b>SUI Otimizado</b>	6,95	8,82	11,23
<b>ECC-33 Otimizado</b>	5,09	6,41	8,18
<b>Modelo Proposto</b>	3,97	5,99	7,19



## **6.4 – Considerações Finais**

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos dos modelos otimizados pelo algoritmo genético desenvolvido para este trabalho. Foi proposto um modelo específico para região em estudo com base no modelo SUI, com referências ao trabalho [5] e otimizado pelo algoritmo genético. Os resultados do modelo proposto se mostraram satisfatórios, reduzindo o erro de predição para o ambiente em estudo.

# CAPÍTULO 7

## Conclusões

---

Esta dissertação objetivou realizar um estudo sobre os modelos de predição de perda de propagação aplicáveis em 3,5 GHz, com o intuito de validá-los para o ambiente do campus da UFRN.

Neste trabalho foi proposto um método de otimização para modelos de predição de perda de propagação utilizando algoritmos genéticos, na tentativa de minimizar a diferença entre os valores medidos e preditos.

Os algoritmos genéticos mostraram bons resultados na otimização dos modelos SUI e ECC-33, reduzindo a diferença entre os valores preditos pelos modelos e os valores medidos no campus da UFRN.

A validação do método proposto foi realizada a partir de comparações com medições realizadas em campo. O método mostrou um bom desempenho, reduzindo o erro médio, o desvio padrão e o erro RMS dos modelos *SUI* em 2,7 dB, 2,8 dB e 3,9 dB, respectivamente, e *ECC-33* em 29 dB, 28 dB e 40 dB, respectivamente.

No intuito de reduzir ainda mais o erro, foi proposto um modelo baseado no *SUI* que, em seguida, foi otimizado pelo algoritmo genético. A validação desse novo modelo foi efetuada a partir de comparações com medições de campo. O novo modelo mostrou um bom desempenho, reduzindo o erro médio para 3,9 dB, o desvio padrão para 5,99 dB e o erro RMS para 7,19 dB.

Os algoritmos genéticos demonstraram ser uma ferramenta robusta, de fácil entendimento e implementação, além de bastante versáteis, devido a sua fácil adaptação a vários problemas.

Na otimização dos modelos de predição de perda de propagação em estudo, os AG's mostraram-se eficazes, podendo ser utilizados na predição de cobertura de sistemas de comunicações móveis.

Em relação à continuidade deste trabalho serão realizados outros estudos, abordando novos modelos de algoritmos genéticos, no sentido de modificar os

operadores genéticos (seleção, *crossover* e mutação) e comparar os resultados com os resultados desta dissertação.

Além disso, também pode-se realizar um estudo comparativo com outros métodos de otimização como, por exemplo, *Particle Swarm Optimization* (PSO), regressão não linear, redes neurais entre outros.

Como trabalho futuro pode-se incluir, também, a realização de campanhas de medições *indoor*, e aplicação dos algoritmos genéticos, e de outros métodos de otimização nos modelos de propagação *indoor*.

# Referências Bibliográficas

---

- [1] E. J. B. Rodrigues, “Um Estudo do Aumento da Capacidade de Sistemas 3G WCDMA Usando Técnicas 3.5G de Expansão do Enlace Reverso”. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFRN Dezembro, 2005.
- [2] DAHLMAN, E. *et al.*, “3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband”. First edition, 2007.
- [3] J. G. Andrews, A. Ghosh, M. Rias, “Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking”. Feb. 2007.
- [4] [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br) acessado em 02 de Abril de 2010.
- [5] C. Rodríguez, “Caracterização do Canal Rádio em Banda Larga na Faixa de 3,5 GHz em Ambiente Urbano”. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.
- [6] R. Silva, “Características da Propagação ponto-área na faixa de 2 a 15GHz com Aplicações em Comunicações Móveis”. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2004.
- [7] M. A. Pereira, “Análise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba – PR na faixa de frequência de 1800 MHz”. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.
- [8] F. Sizenando, “Avaliação dos Modelos de Predição de Propagação para Telefonia Móvel Celular na Cidade do Natal”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte UFRN. Natal, 2006.

- [9] T.S. Rappaport, “Wireless Communications, Principles and Practice”, Prentice Hall PTR, 2000.
- [10] S. Castilho, “Ferramenta de Simulação Computacional de Canal de Propagação em Ambientes Celulares Baseados em Modelos Geométricos Estatísticos”. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle. São Paulo, 2006.
- [11] J. S. Seybold, “Introduction to RF propagation”. John Wiley & Sons, 2005.
- [12] Simon R. Saunders and Alejandro Aragón-Zavala, “Antennas and Propagation for Wireless Communication System”. Second Edition, John Wiley & Sons, 2007.
- [13] ERCEG, V. *et al.* “An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments”. *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 17, pp. 1205–1211, Jul. 1999.
- [14] ABHAYAWARDHANA, V. S. *et al.*, “Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems”. *IEEE 61<sup>st</sup> Vehicular Tech. Conference*, Vol. 1, pp.73 - 77, Junho. 2005.
- [15] TIEDOTTEITA, VTT. Research notes 2376. Design Issues in All-IP Mobile Networks. Finland, 2007. UPASE, B.; *et al.* “Radio Network Dimensioning and Planning for WiMAX Networks”. *FUJITSU Sci. Tech. J.*, n.º 43, 4. Outubro, 2007.
- [16] Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT), “The analysis of the coexistence of FWA cells in the 3.4 - 3.8 GHz band” tech. rep., ECC Report 33, May 2003.
- [17] Linden, Ricardo, “Algoritmos Genéticos”. Segunda Edição, Brasport. Rio de Janeiro, 2008.

- [18] Holland J. H. “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, Michigan: Ann Arbor. University of Michigan Press, 1975.
- [19] Goldberg D. E. “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, New York: Addison Wesley Longman INC., 1989.
- [20] 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.
- [21] C. Guerra, “Otimização Paramétrica de Estruturas Treliçadas por Algoritmos Genéticos”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Novembro, 2008.
- [22] S. L. Ávila, “Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Novembro, 2002.
- [23] Haupt L. R.; Haupt E. S.; “Practical Genetic Algorithms”. John Wiley & Sons. Second Edition, 2004.
- [24] N. S. Sivanandam N. S.; N.S. Deepa, “Introduction to Genetic Algorithms”. Springer, 2008
- [25] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, “Genetic Algorithm in Engineering Electromagnetics”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 39, N°4, Aug. 1997, pp. 7-21.
- [26] 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.

# Apêndice A

## A.1 - Sistema Simplex de Microondas Analógico para TV

### LINEA DIGITAL MO

### Sistemas Simplex de Microondas Analógicos para TV

#### ÁUDIO E VÍDEO - ENTRADAS / SAÍDAS ANALÓGICAS

Quantidades	04 áudios + 01 vídeo
Impedâncias / conectores	áudios= 600Ω / BT 12 vias vídeo=75Ω / BNC fêmea
Níveis	áudios= 0dBm / +4dBm vídeo= 1Vpp
Respostas de frequência	áudio= 30Hz a 15kHz vídeo= 10Hz a 4,5MHz
Pré-ênfase de áudio	75μs

#### FI 70MHz - ENTRADAS / SAÍDAS ANALÓGICAS

Impedância / conector	75Ω / BNC fêmea
Nível	0dBm
Faixa de frequência	60 a 80MHz
Perda de retorno	>26dB

#### VIDEO ANALÓGICO DEMODULADO

Impedância / conector	75Ω / BNC fêmea
Nível	1Vpp ou 140 ±3 IRE
Nível de barra	100 ±2 IRE máx.
Nível de sincronismo	40 ±1 IRE máx.
Distorção de tempo de linha	±0,7% máx.
Inclinação de barra	±1,5% máx.
Distorção de tempo de campo	±3% máx.
Fator K	±2,5%
HAD	±20ns máx.
Distorção de curto tempo	±4% máx.
Ganho crominância / luminância	±1,3% máx.
Retardo crominância / luminância	±20ns máx.
Resposta de frequência	±0,25dB máx.

Ganho diferencial (DG)	±1% máx.
Fase diferencial (DP)	±1° máx.
Relação sinal / ruído ponderado	67dB mín.

#### ÁUDIOS ANALÓGICOS DEMODULADOS

Impedância / conector	600Ω / BT 12 vias
Nível de entrada e saída	0dBm (+4dBm opcional)
Resposta de frequência	30Hz a 15kHz ±1dB operacional 400Hz 0dB
Distorção harmônica total	1% máx.
Relação sinal / ruído	66dB mín.

#### GERAL

Sistema de gerenciamento (Telesupervisão)	conector DB9, padrão RS-232
Oscilador	tipo ressonador dielétrico
Estabilidade de frequência	± 0,01%
Tensão de entrada	90 a 240V <sub>ac</sub> ou ±36V <sub>ac</sub> ou ±48V <sub>dc</sub>
Consumo	TX= 35 a 70W RX= 35W
Dissipação no ambiente	< 985 BTU
Faixa de temperatura ambiente	de 0°C a +45°C
Faixa de umidade ambiente	de 0 a 95% até 40°C
Altitude de operação	até 2000m
Dimensões (mm)	
Main Frame	= 132 (A) x 483 (L) x 355 (P)
Conv. de Tx ou Rx p/ Torre	= 602 (A) x 195 (L) x 248 (P)
Conv. de Tx ou Rx p/ Rack 19"	= 176 (A) x 483 (L) x 355 (P)

MAIN FRAME	MODELO	TIPO	ENTRADAS ANALÓGICAS	SAÍDAS ANALÓGICAS
	MF-9902	TX	01 FI 70MHz	Banda L
	MF-9903	TX	04 Áudios + 01 Vídeo + 01 FI 70MHz	Banda L
	MF-9905	RX	Banda L	04 Áudios + 01 Vídeo + 01 FI 70MHz

	MODELO	TIPO	FAIXA DE FREQUÊNCIA	POTÊNCIA	TIPO DE INSTALAÇÃO	CONEXÃO DE RF
TRANSMISSOR	T2G30P8	TX	2.3 a 2.5GHz	0.8W	Torre	N fêmea
	T2G35P0	TX	2.3 a 2.5GHz	5W	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea
	T3G30P0	TX	3.3 a 3.5GHz	0.8W	Torre	N fêmea
	T3G35P0	TX	3.3 a 3.5GHz	5W	Torre	N fêmea
	T6G50P8	TX	6.5 a 7.0GHz	0.8W	Torre	N fêmea / CPR137G
	T6G53P2	TX	6.5 a 7.0GHz	3.2W	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea / CPR137G
	T7G00P8	TX	7.0 a 7.5GHz	0.8W	Torre	N fêmea / CPR137G
	T7G03P2	TX	7.0 a 7.5GHz	3.2W	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea / CPR137G
RECEPTOR	T1300P5	TX	12.2 a 12.7GHz ou 12.75 a 13.25GHz	0.5W	Torre	WR75
	R2G3000	RX	2.3 a 2.5GHz	—	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea
	R3G3000	RX	3.3 a 3.5GHz	—	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea
	R6G5000	RX	6.5 a 7.0GHz	—	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea / CPR137G
	R7G0000	RX	7.0 a 7.5GHz	—	Rack EIA 19" / Torre	N fêmea / CPR137G
	R130000	RX	12.2 a 12.7GHz ou 12.75 a 13.25GHz	—	Torre	WR75

#### LINEAR EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS S.A

Praca Linear, 100 - CEP 37540-000 - Santa Rita do Sapucaí - MG - Brasil  
 ☎ (5535) 3473 3473 - ✉ (5535) 3473 3474 - linear@linear.com.br - www.linear.com.br

MO-RE/00-SIMPLEX-PO-01-06-B - Todas as especificações estão sujeitas a alteração sem aviso prévio.

## A.2 - Antena Transmissora



www.L-com.com

HyperLink Wireless 3.5 GHz 11 dBi Professional  
Omnidirectional Antenna for 802.16e, WiMAX  
and Wireless LAN Systems

Model: HG3511U-PRO

### Applications and Features

- Applications:**
- 3.5 GHz Band Applications
  - Wireless LAN systems
  - IEEE 802.16e Applications
  - WiMAX
  - Mobile WiMAX
  - SOFDM
  - Multipoint Applications
- Features:**
- Superior performance
  - Heavy duty industrial grade design
  - All weather operation
  - DC Ground lightning protection
  - Integral N-Female Connector
  - Supplied with mast mounting kit
  - RoHS Compliant



### Description

The HyperGain® HG3511U-PRO is a professional high gain omni-directional base station WiFi antenna designed and optimized for the 3.5GHz band. Typical applications include IEEE 802.16e, WiMAX and Mobile WiMAX applications. This antenna is ideally suited for multipoint applications where long range and wide coverage is desired.

The HG3511U-PRO construction features a heavy-duty fiberglass radome for durability and aesthetics. Designed to operate in the harshest of environments, the HG3511U-PRO far exceeds other omni-directional antennas. The included mounting system features heavy-duty stainless steel mast clamps, allowing installation on masts from 1.4 inches (35 mm) up to 2.0 inches (50 mm) diameter. This antenna features an integral N-Female connector.

### Specifications

#### Electrical Specifications

Frequency	3400-3700 MHz
Gain	11 dBi
Polarization	Vertical
Downtilt	0°
Vertical Beam Width	9°
Horizontal Beam Width	360°
Impedance	50 Ohm
Max. Input Power	150 Watts
VSWR	< 1.6:1 avg.
Lightning Protection	DC Ground

L-COM, INC. 45 BEECHWOOD DRIVE NORTH ANDOVER, MA 01845  
WWW.L-COM.COM E-MAIL: SALES@L-COM.COM PHONE: 1-800-343-1455 FAX: 1-978-689-9484  
© L-com, Inc. All Rights Reserved. L-com Global Connectivity and the L-com logo are registered marks.



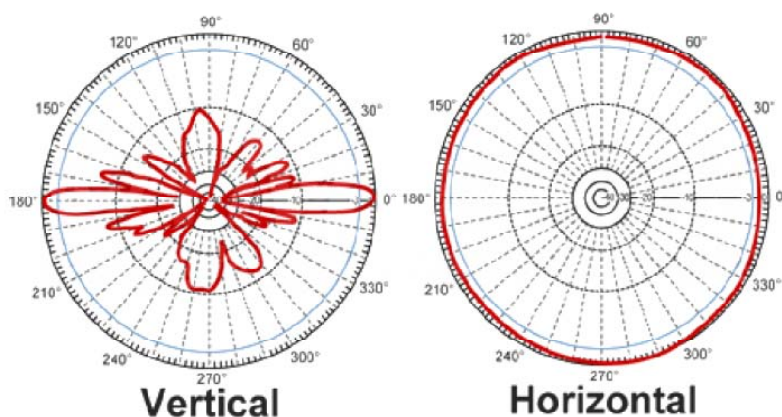
#### Mechanical Specifications

<b>Weight</b>	1.5 lbs (0.7kg)
<b>Length</b>	24.4 in. (0.6m)
<b>Base Diameter</b>	2.28 in. (57.9mm)
<b>Radome Diameter</b>	2.04 in. (51.8mm)
<b>Radome Material</b>	Fiberglass
<b>Mounting</b>	1.4 in. (35 mm) to 2.0 in. (50 mm) dia mast
<b>Rated Wind Velocity</b>	137 MPH/S (270Km/S)
<b>Operating Temperature</b>	-40° C to 85° C (-40° F to 185° F)
<b>Connector</b>	Integral N-Female
<b>RoHS Compliant</b>	Yes

#### Wind Loading Data

Wind Speed (MPH)	Loading
100	6 lb.
125	10 lb.

#### RF Antenna Patterns



#### Guaranteed Quality

This product is backed by L-Com's Limited Warranty.

L-COM, INC. 45 BEECHWOOD DRIVE NORTH ANDOVER, MA 01845  
 WWW.L-COM.COM E-MAIL: SALES@L-COM.COM PHONE: 1-800-343-1455 FAX: 1-978-689-9484  
 © L-com, Inc. All Rights Reserved. L-com Global Connectivity and the L-com logo are registered marks.

## A.3 - Cabo DLC 213 Premium

### Cabos Coaxiais

**DATA LINK**

#### Produto

Cabo Coaxial

DLC 213 Premium



#### Características

Parte do cabo	Material	mm	in
Condutor Interno	Copper Clad Aluminum	2,61	0,103
Isolação	Polietileno expando	7,25	0,285
Condutor Externo	Fita aluminizada	7,35	0,289
Blindagem (trança)	Cobre estanhado (cobertura 75%)	8,14	0,320
Capa	Polietileno preto	10,34	0,407

#### Especificações Mecânicas

Peso do cabo	0,096 kg/m	0,064 lb/ft
Raio mínimo de curvatura	25,4 mm	1,00 in
Temperatura de operação	80°C máx	176°F

#### Especificações elétricas

Impedância nominal	50 ohms
Velocidade de propagação	82%
Capacitância	82 pF/m
Máxima Tensão DC	2,5 kV // 1 min
Resistência do condutor interno	5,5 ohm/km
Resistência da blindagem	8 ohm/km

Frequência (MHz) à 20°C	Atenuação (dB/100m)	Potência Máxima (kW)
30	2,3	3,16
50	2,9	2,44
100	4,2	1,72
200	6,1	1,20
450	9,4	0,79
800	12,8	0,58
900	13,7	0,55
1000	14,6	0,51
1500	18,3	0,42
1800	20,4	0,38
2000	21,6	0,35
2400	24,1	0,32
3000	27,5	0,29
3500	30,2	0,26
5800	41,2	0,20
6600	44,7	0,18
10000	58,4	0,14

AF Datalink Eqtos. de Telecomunicações Ltda. Tel. (11) 5642-0066 Fax: (11) 5641-0012

[www.afdatalink.com.br](http://www.afdatalink.com.br)

## A.4 - Conector

### Conectores de RF Série N169 - 16 IEC

#### ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS

Impedância: 50/75 Ohms

Frequência: 0-11 Ghz

Tensão: 1500 V pico

Rígidez Dielétrica: 2500 V rms

VSWR: 1,3 Max. Na faixa 0-11 Ghz

#### RESISTÊNCIA DE CONTATO

\*Central 1,0 mOhm

\*Extenso 0,2 mOhm

\*Corpo 0,1 mOhm

Fuga de RF: -90 dB mínimo em 3 Ghz

Perda por inserção 0,2 dB máximo em 10 Ghz

Resistência de isolamento: 5 GOhms (mínimo)

#### CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Contatos: Ouro 0,05μ

Corpo: Níquel 0,5 a 0,7μ

#### MONTAGEM

Contato central: Climpado ou soldado

Prensa - cabo: porca e bucha para blindagem



#### Descrição

Contatos Fêmea

Contatos Macho

Corpos

Isolantes

Vedação

#### Material

Bronze BZ 3444

Latão

Latão

Teflon PTFE

Borracha

#### ESPECIFICAÇÕES MECÂNICAS

##### Tratamento

Ouro

Níquel

Níquel

-----

-----

