

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

REGINA DE NASARÉ ALMEIDA DO NASCIMENTO

MODELAGEM NEURO-FUZZY DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA  
PLANEJAMENTO DE REDES LTE

DM:11/2016

UFPA / ITEC / PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
BELÉM – PA  
2016

REGINA DE NASARÉ ALMEIDA DO NASCIMENTO

MODELAGEM NEURO-FUZZY DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA  
PLANEJAMENTO DE REDES LTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Gervásio P.S. Cavalcante

DM: 11/2016

UFPA / ITEC / PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
BELÉM – PA  
2016

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

---

Nascimento, Regina de Nasaré Almeida do, 1970-  
Modelagem neuro-fuzzy de perdas de propagação para  
planejamento de redes LTE / Regina de Nasaré Almeida do  
Nascimento. - 2016.

Orientador: Gervasio Protásio dos Santos  
Cavalcante.

Dissertação (Mestrado) - Universidade  
Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica, Belém, 2016.

1. Sistemas de comunicação  
móvel-Planejamento. 2. Sistemas difusos. 3.  
Redes neurais (Computação). 4. Ondas de  
rádio-Propagação. I. Título.

CDD 22. ed. 621.38456

---

**“MODELAGEM NEURO-FUZZY DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA  
PLANEJAMENTO DE REDE LTE”**

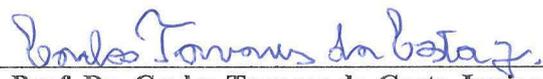
**AUTOR: REGINA DE NASARE ALMEIDA DO NASCIMENTO**

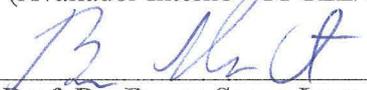
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 06/05/2016

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro**  
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)

**VISTO:**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

“O choro pode durar uma noite, mas  
alegria vem pela manhã, *salmos*  
(30:5)”

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre me iluminando, dando forças e permitindo alcançar meus objetivos com saúde e proteção.

Aos meus queridos pais Porfírio Nascimento (in memoriam) e Domingas Nascimento pela educação, ensinamentos de vida e por serem os principais motivadores na busca dos meus sonhos.

A minha irmã Maria de Jesus e meu cunhado Edson que me acolheram e me motivaram sempre para continuar os estudos.

Ao meu esposo e amigo Marcos, que compreendeu, ajudou e motivou nos momentos que parecia difícil para a finalização deste trabalho.

Ao querido mestre Prof. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela oportunidade em seu grupo de estudos, por sua orientação, confiança e compreensão.

À Prof. Jasmine Araújo, por sua amizade, confiança e incentivo para continuar os estudos.

Aos professores e amigos do Laboratório de Computação e Telecomunicações em especial: Márcio Rodrigues, Hugo Cruz, Charllene Guerreiro, Rita Silva, Alllan Braga, Allan Costa, Bruno Quadros e João Vitor.

Ao amigo Diego Pinheiro pela contribuição na primeira etapa de conclusão do mestrado com horas de estudo e dedicação.

Aos amigos de trabalho Márcio Rodrigues, Rodrigo Oliveira, Milene Alcântara e Bruno Ricardo por toda ajuda, empenho e sugestões.

Aos professores da pós-graduação da Engenharia Elétrica e funcionários do PPGEE.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, por todo o suporte para conclusão deste trabalho.

A Universidade Federal do Pará, pela oportunidade de conclusão desta dissertação.

Regina Nascimento

## RESUMO

O desenvolvimento das tecnologias de comunicação móveis está relacionado com a demanda dos serviços pelos usuários que estão utilizando cada vez mais o serviço de dados do que de voz. E, para acompanhar tais demandas, as empresas de telecomunicações buscam suprir, com novas tecnologias, este usuário em busca de rapidez e qualidade no serviço utilizado pelas redes móveis. A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) tem demonstrado características flexíveis que se destacam em relação às tecnologias que a antecederam como a do GSM e UMTS e que fazem com que as operadoras atendam aos objetivos das redes existentes como serviços de multimídia, eficiência espectral e negócios para banda larga móvel. A organização que desenvolveu as especificações do LTE foi a 3GPP (3rd Generation Partners Project) e normalizado pelo Instituto Europeu de Normalização na área de Telecomunicações ETSI (European Telecommunications Standard Institute). Nesta dissertação, foi realizado um estudo sobre perdas de propagação em ambiente outdoor, a partir de modelos encontrados na literatura e adequados ao canal de propagação. Os resultados de desempenho são apresentados utilizando as métricas do erro médio quadrático e o desvio padrão e por representação gráfica dos dados medidos. Para auxiliar esta análise, é interessante mapear a área e desenvolver ou adequar ferramentas de planejamento de cobertura mais precisas e eficientes. Os dados utilizados neste trabalho foram coletados em algumas vias principais no município de Castanhal, no estado do Pará, região norte do Brasil. A frequência utilizada do sinal transmitido para o LTE foi de 1.800 MHz e o método utilizado para a predição de perda de propagação foi o Neuro-Fuzzy. Este sistema utiliza as técnicas de inteligência computacional que combina Redes Neurais Artificiais (RNA) e Lógica Fuzzy (LF) e tem demonstrado capacidade de resolver diversos tipos de problemas em várias aplicações de diversas áreas. Em seguida foi realizada uma comparação de desempenho entre os valores preditos pelo método proposto e os modelos de propagação da literatura, analisando-se as características do sinal em canais específicos e observando-se as limitações e imposições locais.

**Palavras-chave:** Modelos de propagação; LTE; sistemas fuzzy; medições em campo.

## ABSTRACT

The development of mobile communication technologies is associated to the demand of services by users who are more and more using the data services than voice. And to keep up with those demands the telecommunication enterprises seek to meet with new technologies this user searching for speed and quality in the service used by mobile networks. The technology LTE (Long Term Evolution) has shown flexible features that stand out in relation to the technologies that preceded it as the GSM and UMTS and the operators to meet the goals of existing networks such as multimedia services, spectral efficiency and business for mobile broadband. The organization that developed the LTE specifications is the 3GPP (3rd Generation Partners Project) and standardized by the European Standards Institute in the area of Telecommunications ETSI (European Telecommunications Standard Institute). This dissertation was realized a study about propagation losses in outdoor environment, from models found in the literature and suitable for the propagation channel. Performance results are presented using the metrics of root mean square error and standard deviation and the graphical representation of data measured. And to helpful to understand this analysis is interesting to map the area and deploy or adapt planning tools of coverage with more accurate and efficient. The data used in this study was collected on some main roads in the Castanhal city, of Pará state, northern Brazil. The frequency of the transmitted signal used for LTE is 1.800 MHz and the method used to predict propagation loss was Neuro-Fuzzy. This system uses the techniques of Computational Intelligence that combines Artificial Neural Networks (ANN) and Fuzzy Logic (LF) and have demonstrated ability to solve different types of problems in various applications in different areas. And through this technique, the comparison between the results predicted by the proposed method and literature propagation models to provide an analysis by the signal characteristics in specific channels, observing the limitations and local features.

**Keywords: Propagation Models, LTE, Systems Fuzzy, Field Measurements.**

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Curvas de potência excedendo 50% do tempo para frequência de 100 MHz .....	11
<b>Figura 3.1</b> - Funções de pertinência referente a variável temperatura .....	17
<b>Figura 3.2</b> - Representação da forma triangular .....	19
<b>Figura 3.3</b> - Representação analítica da forma trapezoidal .....	20
<b>Figura 3.4</b> - Representação da função gaussiana .....	21
<b>Figura 3.5</b> – Configuração básica de sistema fuzzy Takagi e Sugeno .....	23
<b>Figura 3.6</b> - Estrutura de um neurônio artificial .....	24
<b>Figura 3.7</b> - Exemplo de uma Rede Neural em Multicamadas.....	26
<b>Figura 3.8</b> - Rede Neural de uma camada .....	27
<b>Figura 3.9</b> - Rede Neural multicamadas .....	27
<b>Figura 3.10</b> - Redes Neural Artificial <i>feedforward</i> .....	28
<b>Figura 3.11</b> - Redes Neural Artificial <i>feedbackward</i> .....	28
<b>Figura 3.12</b> - Exemplo de sistema híbrido .....	30
<b>Figura 3.13</b> - Arquitetura básica de um SNF .....	31
<b>Figura 4.1</b> - Arquitetura rede LTE .....	36
<b>Figura 4.2</b> - Arquitetura Geral E-UTRAN .....	37
<b>Figura 4.3</b> - Visão básica OFDMA .....	39
<b>Figura 4.4</b> - Comparação entre OFDMA e SC-FDMA .....	40
<b>Figura 4.5</b> - Representação MIMO2x2 .....	41
<b>Figura 5.1</b> - Mapa de Castanhal .....	44
<b>Figura 5.2</b> – Região no centro de Castanhal .....	45
<b>Figura 5.3</b> – Exemplo de uma das antenas na localidade .....	46
<b>Figura 5.4</b> – Interface do aplicativo G-NetTrack .....	48
<b>Figura 5.5</b> – Dados de rede coletados no G-NetTrack .....	49
<b>Figura 5.6</b> - Rota realizada em Castanhal. ....	50
<b>Figura 6.1</b> – Ilustração básica de um sistema de telecomunicação.....	53
<b>Figura 6.2</b> – Esquema do cálculo entre dois pontos da superfície terrestre .....	54
<b>Figura 6.3</b> - Características do Sistema de Inferência Fuzzy .....	55
<b>Figura 6.4</b> – Configuração do treinamento do Sistema Neuro-Fuzzy .....	56
<b>Figura 6.5</b> - Função de Pertinência variável Distância.....	57
<b>Figura 6.6</b> - Função de Pertinência variável Sinal Ruído.....	57
<b>Figura 6.7</b> - Resultado da aplicação das regras.....	58

<b>Figura 7.1</b> – Predição de propagação para a Rota 1 .....	60
<b>Figura 7.2</b> – Predição de propagação para a Rota 2.....	61
<b>Figura 7.3</b> – Predição de propagação para a Rota 3.....	62
<b>Figura 7.4</b> – Predição de propagação para a Rota 4.....	64
<b>Figura 7.5</b> – Predição de propagação para todas as Rotas .....	65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1</b> - Especificações das Antenas.....	46
<b>Tabela 5.2</b> - Rota teste de Castanhal .....	50
<b>Tabela 7.1</b> - Dados Calculados para as Rotas 1.....	61
<b>Tabela 7.2</b> - Dados Calculados para as Rotas 2.....	62
<b>Tabela 7.3</b> - Dados Calculados para as Rotas 3.....	63
<b>Tabela 7.4</b> - Dados Calculados para as Rotas 4.....	64
<b>Tabela 7.5</b> - Dados Calculados para todas as Rotas.....	65

## LISTA DE ACRÔNIMOS

- 3GPP** - *3rd Generation Partnership Project*
- AG** – Algoritmo Genético
- ANFIS** – *Adaptive Network Fuzzy Inference System*
- E.R.P** – *Effective Radiated Power*
- eNodeB** - *Evolved NodeB*
- EPC** – *Evolved Packet Core*
- EPS** – *Evolved Packet System*
- EQM** - Erro Médio Quadrático
- ERB** – Estação Rádio Base
- E-UTRAN** - *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*
- FDD** - *Frequency Division Duplex*
- FIS** – *Fuzzy Inference System*
- FP** – Função Pertinência
- GSM** - *Global System for Mobile Communications*
- HSS** - *Home Subscriber Serve*
- IP** – *Internet Protocol*
- ITU** – *International Telecommunication Union*
- LF** – Lógica Fuzzy
- LOS** – *Line of Sight*
- LTE** – *Long Term Evolution*
- MIMO** - *Multiple Input Multiple Output*
- MME** - *Mobility Management Entity*
- NLOS** – *non-line-sight*
- OFDM** - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- OFDMA** - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
- PAPR** - *Peak to Average Power Ratio*
- P-GW** - *Packet Data Network Gateway*
- RF** – Rádio Frequência
- RN** – Rede Neural
- RNA** – Redes Neurais Artificiais
- RMS** - *Root Mean Square*

**RNC** - *Radio Network Controller*

**SAE-GW** - *System Architecture Evolution Gateway*

**SC-FDMA** - *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*

**S-GW** - *Serving Gateway*

**SNF** – *Sistema Neuro-Fuzzy*

**TDD** - *Time Division Duplex*

**TM** – *Terminal Móvel*

**UHF** – *Ultra High Frequency*

**UMTS** - *Universal Mobile Telecommunication System*

**VHF** – *Very High Frequency*

**VL** – *Variável local*

**WCDMA** - *Wideband Code Division Multiple Access*

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	viii
SUMÁRIO .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivo Geral.....	3
1.3 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Trabalhos Correlatos .....	3
1.5 Estrutura da Dissertação .....	5
2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO OUTDOOR .....	6
2.1 Introdução.....	6
2.2 Modelos Determinísticos.....	7
2.3 Modelos Empíricos .....	7
2.4 Modelos Semi-Empíricos.....	7
2.4.1 Modelo OKUMURA-HATA.....	8
2.4.2 Modelo COST 321-HATA.....	10
2.4.3 Recomendação ITU-R P.1546-4.....	10
2.4.4 Walfisch-Ikegami.....	12
2.5 Considerações Finais .....	13
3 SISTEMAS NEURO-FUZZY .....	14

3.1	Introdução.....	14
3.2	Lógica Fuzzy.....	15
3.2.1	Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	15
3.2.2	Operações com conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	16
3.2.3	Variáveis Linguísticas.....	17
3.2.4	Base de Regras.....	18
3.2.5	Funções de Pertinência.....	18
3.2.6	Inferência <i>Fuzzy</i> .....	21
3.3	Fuzzificação.....	21
3.4	Tipos de Sistemas <i>Fuzzy</i> .....	22
	- Sistema <i>Fuzzy</i> Takagi-Sugeno-Kang.....	22
3.5	Redes Neurais Artificiais.....	23
3.5.1	O Neurônio Artificial.....	24
3.5.2	Características Rede Neural.....	25
3.5.3	Estrutura da Rede Neural.....	25
3.5.4	Arquitetura Rede Neural.....	26
3.5.5	Aprendizado.....	29
3.6	Sistemas <i>Neuro-Fuzzy</i> .....	30
3.7	<i>Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS)</i> .....	30
3.8	Considerações Finais.....	33
4	FUNDAMENTOS DA REDE LTE.....	34
4.1	Introdução.....	34
4.2	História da Rede LTE.....	34
4.3	Arquitetura da Rede LTE.....	35
4.3.1	Redes de Acesso E-UTRAN.....	36
4.3.2	Núcleo de Rede <i>Envolved Packet Core (EPC)</i> .....	37
4.4	Princípios da Interface Aérea LTE.....	39

4.4.1	OFDMA – <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> .....	39
4.4.2	SC-FDMA – <i>Single Carrier – Frequency Division Multiple Access</i> .....	40
4.5	Múltiplas Antenas .....	40
4.6	Flexibilidade do Espectro .....	41
4.6.1	LTE 1800MHz.....	42
4.7	Considerações Finais .....	43
5	METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	44
5.1	Introdução.....	44
5.2	Caracterização do Ambiente .....	44
5.3	Coleta de Dados.....	45
5.4	Configuração do Receptor .....	48
5.5	Configuração das Rotas.....	49
5.6	Considerações Finais .....	51
6	METODOLOGIA PARA TRATAMENTO DOS DADOS E OBTENÇÃO DOS RESULTADOS .....	52
6.1	Introdução.....	52
6.2	Tratamento de Dados.....	52
6.2.1	Cálculo da Perda de Propagação .....	52
6.2.2	Cálculo da Distância Entre Dois Pontos .....	53
6.3	Descrição da Configuração do <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFINS).....	54
6.4	Considerações Finais .....	58
7	RESULTADOS .....	59
7.1	Introdução.....	59
7.2	Capacidade de Predição e Comparação com os Modelos de Propagação ..	59
7.2.1	Rota 1. ....	60
7.2.2	Rota 2. ....	61
7.2.3	Rota 3. ....	62

7.2.4	Rota 4.....	63
7.2.5	Generalização dos Dados.....	64
7.3	Considerações Finais.....	66
8	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

# 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações móveis estão em constante evolução desde a década de 80, e isso despertou o interesse comercial nos serviços de voz, dados, vídeo e videoconferência. Neste contexto pesquisadores de comunicação sem fio procuraram entender e prever as características do sinal de propagação em várias áreas urbanas e suburbanas.

Os modelos de propagação possuem a função de ferramenta de predição para verificar a cobertura de sinal de rádio e por isso são utilizados pelas empresas prestadoras de serviços de comunicações móveis [1]. Levando em consideração que estes perdem a precisão quando são utilizados em ambiente diferente do que os mesmos foram realizados, torna-se necessária a existência de uma variedade de modelos.

As metodologias usadas em ajustes de modelos de propagação abrangem diversas etapas como: experimento de campo para coleta de dados, tratamento dos dados, utilização de simulações, ajuste do modelo proposto na literatura técnica, entre outras.

A avaliação do impacto relacionado às características ambientais na atenuação do sinal torna-se muito importante para que o ambiente em estudo seja planejado coerentemente. Para isto, também é necessária uma ferramenta que viabilize este tipo de tratamento de variáveis a fim de se determinar quantitativamente atenuação que estas características acarretam no sinal do receptor.

Com o avanço da tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), torna-se necessário um estudo para comparar o desempenho dos modelos existentes em relação à perda de propagação medida na faixa de 1.800 MHz e, assim, adequá-los a esta tecnologia, que ainda é considerada nova.

Uma campanha de medições em LTE foi realizada na cidade de Castanhal no Estado do Pará, localizado na região norte do Brasil e teve como objetivo a obtenção de um modelo para prever a perda de propagação e comparar com alguns modelos da literatura dentro da frequência 1.800 MHz.

Como ferramenta de auxílio para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado a Lógica *Fuzzy* (LF), pois esta tem sido adotada na resolução de muitos problemas de aplicações científicas e na engenharia quando envolvem conceitos que não são mensurados e quantificados com alguma precisão [2]. As Redes Neurais Artificiais (RNA) e a Lógica *Fuzzy*, são técnicas, de inteligência computacional que combinadas formam o sistema *Neuro-Fuzzy*.

A partir do resultado obtido pelo sistema de predição *Neuro-Fuzzy* verificou-se que os dados simulados reproduzem os medidos com boa precisão e que quanto mais o conjunto de dados é treinado reduz o erro de predição e melhora os resultados na predição de atenuação para ambiente outdoor.

## 1.1 Motivação

Os modelos de propagação tradicionais existentes nem sempre se adaptam bem à Região Amazônica por apresentar características de área urbana mista e de regiões florestais [3], [4]. Considerando essas particularidades no ambiente (arquitetura, prédios com alturas médias e baixas, construções residenciais, vegetação bem diversificada composta por árvores altas e médias e com folhagem densa, entre outras), elas provocam uma diferenciação na atenuação no sinal propagado, e estas características não são completamente abordadas nos modelos já conhecidos na literatura.

Outro fator de motivação se dá pelo fato de que a tecnologia LTE é considerada nova, em concretização e em expansão no Brasil [5]. Na região norte, cujas características de ambiente já foram citadas, e no estado do Pará, especificamente em algumas regiões, onde o LTE atua na frequência de 1.800 MHz, tem-se ainda pouca informação sobre atenuação de um sinal de tecnologia LTE.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é obter um modelo para prever a perda de propagação e comparar com modelos de propagação existentes na literatura para verificar o melhor comportamento no planejamento da tecnologia LTE na faixa de frequência de 1.800 MHz.

## 1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar e avaliar o resultado com outros modelos da literatura que contenham as mesmas características da região em estudo.
- Demonstrar que, por meio de testes em campo foi possível medir a recepção do sinal utilizando a tecnologia LTE na frequência 1.800 MHz, e avaliar a eficiência da solução desenvolvida comparando com outros modelos empíricos utilizados pela comunidade científica.
- Utilizar a Lógica *Fuzzy* e *Neuro-Fuzzy*, para gerar uma ferramenta robusta para otimizar os resultados dos modelos de predição de atenuação do sinal.
- Realizar um mapeamento das áreas em relação à atenuação de sinal e analisá-lo de acordo com a resolução das instituições regulamentadoras dos serviços de telecomunicações.

## 1.4 Trabalhos Correlatos

Na literatura técnica, vários modelos empíricos de propagação de sinal visam prever a potência do sinal de recepção. Diversos tipos de ambientes podem ser considerados. Por exemplo, analisar somente as edificações, mas não os obstáculos nelas presentes, principalmente quando essas são voltadas para cidades que apresentam em seu interior regiões densamente arborizadas.

Em (PINHEIRO, 2015), [6], tem como objetivo o estudo e a otimização de modelos de perdas de propagações outdoor disponibilizados na literatura. Estes modelos operam na faixa de frequência de 2,6GHz para a tecnologia LTE, com o intuito de proporcionar uma predição de perda de propagação mais precisa para o ambiente estudado. Uma campanha de medições foi realizada na cidade de Belém-PA para comparar quão satisfatórias são os ajustes dos modelos de predição de propagação com a perda do sinal medido nas rotas realizadas.

Nesse trabalho, a técnica do Algoritmo Genético (AG) foi utilizada para a otimização de todos os modelos de predição na dissertação e, através dessa técnica, foi possível obter a um resultado satisfatório dos modelos estudados em comparação as perdas encontradas nas rotas realizadas, dessa forma contribui no planejamento mais eficiente para redes que operam na faixa de 2,6GHz do LTE.

Em (MELLO, 2011), [7], foi elaborado um modelo empírico de predição para parques urbanos dentro da faixa de 900-2400 MHz. A campanha de medição foi realizada em abril de 2011 no Jardim Botânico de Niterói-RJ e os dados foram coletados de duas rotas realizadas no parque. Após determinar o modelo de propagação, realizou-se uma comparação, qualitativa e quantitativa entre o modelo de predição proposto e alguns modelos da literatura que são aplicáveis à ambientes de vegetação.

O artigo (FERREIRA, *et al.*, 2012), [8], trata da utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) na predição de cobertura de sinal rádio em terreno acidentado na faixa de VHF. As medições realizaram-se na avenida Brasil, região suburbana do Rio de Janeiro, propiciando a propagação sob o mecanismo de difração. Foram comparadas as curvas de predição geradas a partir dos métodos recomendados pelo ITU (*International Telecommunication Union*), considerando a perda no espaço livre e por difração, com a curva gerada por uma RNA, mostrando melhor aderência desta última aos dados experimentais.

A dissertação de mestrado apresentada em (GONZALES, 2009), [9], é uma pesquisa baseadas no estudo de análise de atenuação de sinal para

ambientes indoor, por meio da aplicação de Lógica Fuzzy para o cálculo do parâmetro Beta ( $\beta$ ) do modelo de propagação do sinal de *Shadowing*. Com isso foi possível obter o valor da variável de perda de percurso representativo da atenuação ocasionada pelo meio e os obstáculos presentes, caracterizando de forma detalhada o ambiente em estudo e o impacto dos fatores que afetam na degradação do sinal.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está dividido em oito capítulos que estão organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 aborda alguns modelos de propagação conhecidos na literatura.

O capítulo 3 apresenta o Sistema Fuzzy e a técnica Neuro-Fuzzy.

O capítulo 4 apresenta breve histórico, arquitetura e conceitos sobre o LTE.

O capítulo 5 apresenta a aquisição de dados e a forma como foram adquiridos e o *setup* de medição.

O capítulo 6 apresenta a metodologia e aborda os cálculos realizado na fase de tratamento de dados e as configurações utilizadas no sistema *Neuro-Fuzzy*.

O capítulo 7 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia empregada.

O capítulo 8 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## 2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO OUTDOOR

### 2.1 Introdução

A predição da área de cobertura é muito importante no planejamento de qualquer sistema de Radiodifusão. Uma grande variedade de modelos de canal são utilizados para prever a perda de propagação na faixa de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*).

Depois de muitos anos de pesquisa a partir do início da difusão das ondas de rádio, estudos apontam quais as variáveis que mais afetam o sinal e sua propagação, e os principais fatores que interferem em sua qualidade. Os estudos destas propriedades permitem a otimização dos projetos de implantação de sistemas de radiopropagação.

A transmissão das ondas de rádio em um sistema de comunicação móvel, às vezes ocorre em terreno que deve ser considerado para calcular a atenuação do percurso em estudo.

O perfil do terreno pode variar de um terreno plano, montanhoso e terra-água. Por isso ambientes que contenham presença de árvores, construções e outros obstáculos, devem ser levadas em consideração.

Os modelos de propagação visam prever a intensidade do sinal em um ponto de recebimento particular ou em um local específico [10]. Os métodos variam muito na sua abordagem, complexidade e precisão. Alguns modelos geralmente necessitam de parâmetros empíricos ou semi-empíricos bem avaliados para que possam estimar a cobertura para um determinado tipo de serviço da maneira mais realista.

Os principais fenômenos responsáveis pela atenuação da propagação do sinal são aqueles que dependem por exemplo: da intensidade, do tipo de relevo em que o sinal se propaga e da altura da edificação [11]. Esses fatores são os maiores responsáveis pelas perdas por reflexões, difrações e espalhamentos.

Nesta dissertação, serão descritos alguns modelos de propagação que possuem, características de acordo com o detalhe das informações e do ambiente analisado, classificados como: Modelos Determinísticos, Modelos Empíricos e Semi-Empíricos

## **2.2 Modelos Determinísticos**

Os modelos determinísticos, ou modelos teóricos, são fundamentados em leis da física que regem a propagação das ondas eletromagnéticas. Tais modelos incluem a atenuação do espaço livre, outras formas de equacionar os efeitos de difração, reflexão no terreno e espalhamento [12]. Esses tipos de modelos necessitam da utilização de bases de dados topográficos. Dessa forma, exige um alto poder computacional e possui pouca generalização sendo, em muitos casos inviável em projetos. Por este se aplicar em cenários específicos costumam ser utilizados em ambiente indoor.

## **2.3 Modelos Empíricos**

Esses tipos de modelos são fundamentados em resultados de campanhas de medições realizadas para determinados tipos de ambientes e também para faixas de parâmetros específicos (altura das antenas, frequência, etc). Tais modelos utilizam equações de simples implementações, essas não necessitam de alto poder computacional e contabilizam fatores que podem contribuir para um ambiente com critérios diferenciados levando em consideração a edificação (prédios, casas), vegetação (densa, não densa).

## **2.4 Modelos Semi-Empíricos**

Estes modelos são utilizados para a região urbana e são também obtidos a partir de coleta de informações de cobertura de uma determinada área e da teoria eletromagnética clássica que considera fenômenos como reflexão em estruturas, refração e difração em bordas de obstáculos. Neste capítulo alguns modelos classificados como empíricos, semi-empíricos serão apresentados.

### 2.4.1 Modelo OKUMURA-HATA

O modelo de Okumura-Hata *et al.*(1968), [13], considerado empírico foi desenvolvido com base em uma extensa campanha de medidas na área de Tokyo. Esse modelo é válido para frequências entre 150 MHz a 1,5GHz e utilizado para antenas de transmissão com alturas efetivas entre 30 m e 200 m e para antenas de recepção entre 1m e 10 m.

O cálculo desse modelo baseia-se na introdução de correções, obtidas graficamente, sobre o valor de atenuação de espaço livre sendo este obtido por Okumura expressa na equação 2.1.

$$L(dB) = L_{bf} + A(f, d) - G_{area}(f, morf) - G_T(h_{Te}, d) - G_R(h_R, d) \quad (2.1)$$

Sendo:

- $L(dB)$  - valor da perda de propagação;
- $L_{bf}$  - perda de propagação no espaço livre;
- $A(f, d)$  - atenuação média para áreas urbanas em função da frequência ;
- $G_{area}(f, morf)$  - ganho do ambiente em função da frequência;
- $G_T(h_{Te}, d)$  - fator de correção da antena transmissora em função da distância;
- $G_R(h_R, d)$  - fator de correção da antena receptora função da distância.

A classificação da área de cobertura do sistema, observando os obstáculos encontrados no percurso estão descritas abaixo.

- Áreas abertas: Espaço aberto, ausência de árvores altas ou prédios no trajeto, terrenos planos de 300-400m, fazendas, campos abertos, entre outros.
- Área Suburbana: Vilarejos, estradas com árvores e casas, com obstáculos nas proximidades do receptor móvel, mas não de forma congestionada.
- Área Urbana: Grandes cidades com prédios altos e casas com dois ou mais andares, ou grandes vilarejos com casas próximas e altas, e com árvores com vegetação densa.

Para se trabalhar melhor com o modelo de Okumura utiliza-se a expressão ajustada por Hata. A perda de propagação do modelo Hata para ambientes urbanos é dada pela equação 2.2.

$$L_U (dB) = 69,55 + 26,26 \log(f) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + 44,9 - 6,55 \log(h_t) \log(d) \quad (2.2)$$

Sendo:

- $f$  – frequência de transmissão em MHz ;
- $h_t$  – Altura do transmissor em metros;
- $h_r$  – Altura do receptor em metros;
- $a(h_r)$  – Fator de correção para a altura da antena em função do tipo da área de cobertura em dB;
- $d$  – distância em Km entre as antenas (transmissor e receptor).

Fator de correção para cidades pequenas e médias:

$$a(hr) = [1,1 \log(f) - 0,7]hr - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad (2.3)$$

Fator de correção para cidades grandes:

$$a(h_r) = 8,29[\log(1,54h_r)]^2 - 1,1 \quad \text{para } f \leq 300\text{MHz} \quad (2.4)$$

$$a(h_r) = 3,2[\log(11,75h_r)]^2 - 4,97 \quad \text{para } f \geq 300\text{MHz} \quad (2.5)$$

Para o cálculo da perda de propagação áreas suburbanas e rurais modifica-se a equação para área urbana apresentadas em 2.6 e 2.7.

$$L_{suburbana} = L_{urbana} - 2[\log(f / 28)]^2 - 5,4 \quad (2.6)$$

$$L_{rural} = L_{urbana} - 4,78[\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (2.7)$$

O resultado desses dois trabalhos é usado como referência para comparar com outros modelos existentes na literatura ou para criar novos modelos.

## 2.4.2 Modelo COST 321-HATA

A partir do modelo de Okumura-Hata a Cooperativa Europeia para pesquisa Científica e Técnica [14], apresentou esse modelo de propagação onde possibilita a predição da perda de propagação para faixas de frequência de 1500 MHz 2000 MHz. A equação que representa esse modelo é dada em 2.8:

$$L = 46,3 + 39,9 \log(f) - 13,82(\log(h_t) - a(h_r)) + [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d) + C_m \quad (2.8)$$

Sendo:

- $C_m$  - 0 dB para áreas urbanas médias e suburbanas;
- $C_m$  - 3 dB para grandes centros urbanos;

## 2.4.3 Recomendação ITU-R P.1546-4

A Recomendação ITU-R P. 1546-4, definida pela União Internacional de Telecomunicações [15], consiste em um conjunto de recomendações para o cálculo de predição de serviços terrestres ponto área na faixa de frequência de 30 MHz a 3000 MHz em distâncias entre 1 km a 1000km.

Esta recomendação é considerada semi-empírico, já que fornece um método para predição da intensidade de campo em serviços de radiodifusão, móvel terrestre, móvel marítimos e percursos mistos. Nesta recomendação para percursos mistos (terrestres e marítimos), os percursos que são marítimos devem ser considerados terrestres.

A recomendação tem como base curvas de propagação que representam o valor de intensidade de campo elétrico apresentada na Figura 2.1, para uma potência efetiva irradiada no valor de 1kW (E.R.P.- Effective Radiated Power), para valores de frequências nominais em 100, 600 e 2000 MHz ,e com porcentagem de tempo excedido para atendimento de 1%, 10% e 50%. Apresenta curvas de 10 m até 1200 m de altura efetiva da antena transmissora, correção do campo baseada no ângulo de visada do terreno e correção para terrenos mistos, além de outras características [16].

Para se obter valores da intensidade de campo em faixas de frequência é necessário fazer o uso da interpolação e extrapolação dos valores obtidos nas frequências nominais utilizando o método da recomendação. As interpolações podem ser feitas em função da frequência de operação, da distância ou da porcentagem do tempo desejado para o atendimento.

Os gráficos desta recomendação são baseados nas regiões onde as medições foram realizadas na Europa e América do Norte em condições de clima moderado em regiões sobre áreas marítimas frias e quentes. Se o percurso percorrido pelo raio se encontrar sobre áreas marítimas e terrestres, a recomendação possui um método para estimar a intensidade de campo sobre estes percursos.

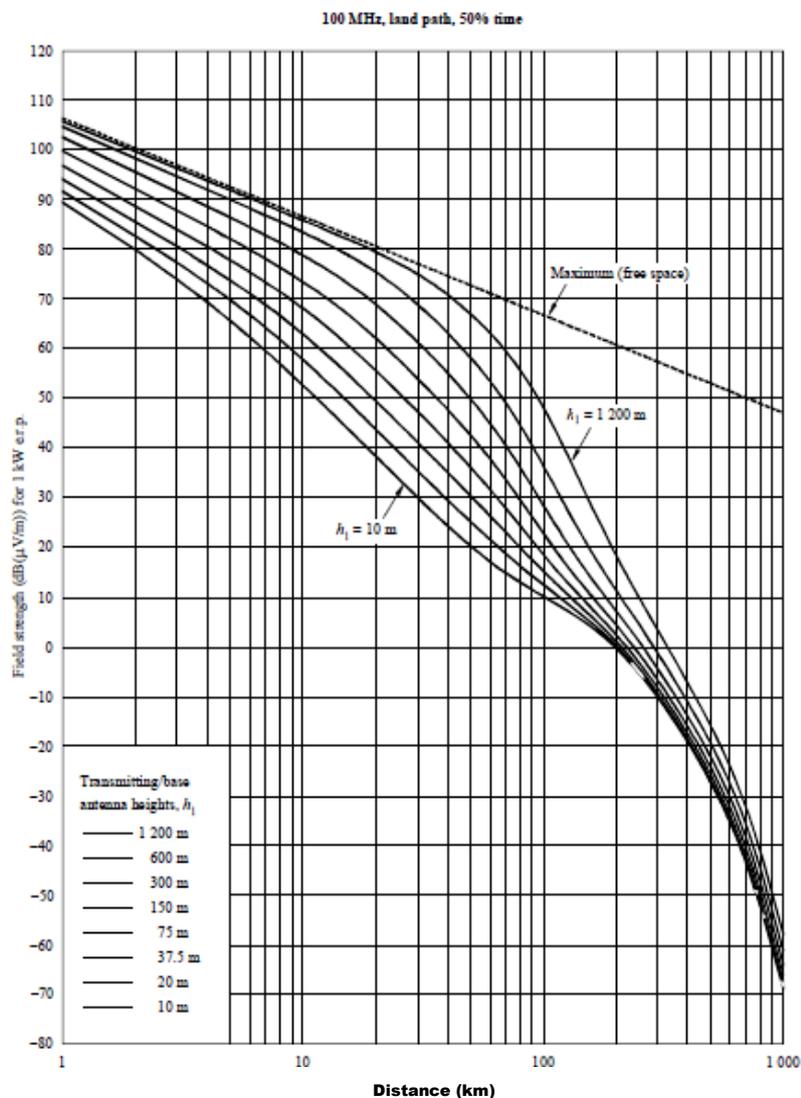


Figura 2.1 – Curvas de potência excedendo 50% do tempo para frequência 100 MHz. [15].

As curvas que representam percursos sobre o solo foram obtidas a partir de dados encontrados na Europa e América do Norte. Enquanto que as curvas sobre o mar foram realizadas a partir de dados encontrados das regiões do Mar Mediterrâneo e o oceano do norte da Europa.

Este modelo leva em consideração a Variabilidade Local (VL), que analisa o comportamento do campo elétrico dentro de uma determinada região onde a cobertura possui dimensões definidas. A variação de tipos de construções, nível de arborização, relevos etc., são alguns fatores que podem explicar a variação da intensidade do campo elétrico.

#### 2.4.4 Walfisch-Ikegami.

O modelo de Walfisch–Ikegami, [17] é semi-empírico, com características de regiões urbanas como altura média das edificações, densidade e largura das ruas. A eficiência deste modelo é no caso em que altura das antenas é menor que altura média das construções e prevê duas diferentes situações para cálculo da atenuação média de percurso entre o terminal móvel (TM) e a estação rádio base (ERB). As situações citadas anteriormente são:

- Existência de visada direta (LOS - *line of sight*);
- Ausência de visada direta (NLOS - *non-line-sight*).

Para a existência de visada direta entre o terminal móvel e a estação rádio base, o modelo de atenuação de percurso é de acordo com o modelo calculado por:

$$L_p(LOS) = 42,6 + 20\log(f) + 26\log(d) \quad (2.9)$$

Sendo:

- $f$  : frequência de operação em MHz;
- $d$  : distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km.

Para ausência de visada direta, a atenuação média total de propagação do modelo é calculado por:

$$LNLOS (db) = 32,4 + 20\log(f) + 26\log(d) + L_{mult} + L_{diff} \quad (2.10)$$

Sendo:

- $f$  : frequência de operação em MHz;
- $d$  : distância entre transmissor (ERB) e receptor (TM) em Km.
- $L_{mult}$ : atenuação adicional devido a múltipla difração (dB);
- $L_{diff}$ : atenuação adicional por simples difração e por espalhamento (dB).

## 2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram citados modelos de propagação presentes na literatura, onde alguns destes modelos apresentados serão utilizados durante a análise comparativa com o modelo predito proposto nesta dissertação.

A finalidade dos modelos de propagação é prever a atenuação existente entre o transmissor e receptor. E para obter um bom desempenho do modelo de predição é aproximado com os valores de perda real e com isso passa a ser uma ferramenta indispensável para planejar uma rede de comunicações móveis.

O próximo capítulo desta dissertação irá tratar sobre a metodologia utilizada para aquisição de dados.

## 3 SISTEMAS NEURO-FUZZY

### 3.1 Introdução

O ser humano é capaz de lidar com processos complexos, utilizando como estratégia informações de natureza imprecisa ou aproximadas, as quais geralmente podem ser expressas em termos linguísticos [18].

Os Sistemas *Fuzzy* são adequados para a criação de modelos a partir de um conhecimento racional e linguisticamente tratável por especialistas humanos, denominadas informações subjetivas [19].

Em 1965, Lofti A. Zadeh introduziu a teoria dos conjuntos *fuzzy*, ele formalizou em seu artigo denominado *Fuzzy Sets* [20], suas ideias sobre uma nova ferramenta matemática que trata de incertezas.

A utilização da teoria da Lógica *Fuzzy* (LF) pode traduzir, em termos matemáticos, a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas baseados no pensamento humano. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma SE-ENTÃO, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. Isto resulta em um sistema de inferência baseado em regras, no qual a teoria de conjuntos *fuzzy* fornece a ferramenta matemática para se lidar com as regras linguísticas.

O número e variedade de aplicações da LF têm aumentado significativamente em diversas áreas [21], [22], motivados pelo sucesso prático de controle *fuzzy*, com aplicações nas mais diferentes áreas do conhecimento como: produtos de consumo e controle de processos industriais, controle de tráfego metropolitano, sistemas de apoio à decisão. Os estudos teóricos tentam explicar por que os resultados práticos são bons, tornando possíveis a solução de problemas complexos em várias aplicações de engenharia e na vida cotidiana.

A lógica *fuzzy* pode ser considerada como o resultado de uma generalização da lógica clássica. Isto é, nessa abordagem, os conceitos

imprecisos são incorporados à lógica clássica. Uma característica central dos sistemas *fuzzy* é que eles são baseados no conceito de partição *fuzzy* [23], que são os termos definidos para a variável linguística que será apresentado em 3.3.

A representação da informação nos sistemas *fuzzy* procura imitar o processo de raciocínio humano, levando em consideração os conhecimentos heurísticos e verificando informações que estejam a princípio sem contexto. [24].

## 3.2 Lógica Fuzzy

A LF, também conhecida como difusa ou nebulosa, na verdade, representa uma forma inovadora de traduzir informações vagas, imprecisas, em valores numéricos, possibilitando incluir a experiência humana em controle computadorizado e tornando possível a tomada de decisões em problemas complexos. Este sistema pode ser agregado a redes neurais aumentando o aprendizado e interface com dados numéricos [25].

O sistema de modelagem e controle em LF aplicado na indústria é recomendado como uma ferramenta eficiente na engenharia, comunicação homem-máquina e sistemas de tomada de decisão.

### 3.2.1 Conjuntos *Fuzzy*

De acordo com a teoria clássica de conjuntos, existem apenas duas possibilidades de pertinência de um elemento em relação a um dado conjunto, ou seja, o elemento pertence ao conjunto ou não pertence [26].

A pertinência de um elemento  $x$ , ( $x \in U$ ), em relação a um conjunto  $A$  somente pode assumir dois valores: 0 ou 1. Essa pertinência é caracterizada pela seguinte função  $\mu_A(x):U \rightarrow \{0,1\}$ , e possui a seguinte característica:

$$\mu_A(x) \begin{cases} 1, & \text{Se } x \in A \\ 0, & \text{Se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Um conjunto fuzzy é uma generalização do conceito clássico de conjunto. Considere o conjunto  $X$  formado por todos os elementos possíveis em uma aplicação ou contexto, onde  $X$  é um universo de discurso. Um conjunto fuzzy  $A$  em  $X$ , representado pela notação  $A \subset X$ , é definido pelos pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (3.2)$$

onde  $\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$  é denominada função de pertinência de  $x$  em  $A$ . Essa função denota o quanto  $x$  pertence a  $A$ . Os valores de  $\mu_A(x)$  próximos a 1 representam alta pertinência de  $x$  em  $A$ , e os valores próximos de 0 representam baixa pertinência de  $x$  em  $A$ .

A imprecisão do mundo real pode ser representada em um conjunto *fuzzy* devido à possibilidade da função de pertinência assumir valores no intervalo  $[0,1]$ . Com a utilização desse recurso matemático, a lógica fuzzy torna-se eficiente analiticamente o conhecimento humano aos conceitos sistemáticos da engenharia.

### 3.2.2 Operações com conjuntos *Fuzzy*

As operações entre conjuntos *fuzzy* são definidas da mesma forma que as operações com conjuntos da lógica clássica. Sendo comum definir os operadores de complemento ou negação, união e interseção [27].

Considere dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  com funções de pertinência  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , definidos no universo de discurso  $U$ . Então as seguintes operações fuzzy podem ser definidas:

1. A função de pertinência do conjunto *fuzzy*  $C$  resultante da operação AND ou interseção entre esses dois conjuntos *fuzzy* ( $C = A \cap B$ ) representado pela equação 3.3:

$$\mu_C(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in U \quad (3.3)$$

2. A função de pertinência do conjunto *fuzzy*  $D$  resultante da operação OR ou união entre esses dois conjuntos *fuzzy* ( $D = A \cup B$ ) representado pela equação 3.4:

$$\mu_D(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in U \quad (3.4)$$

3. A função de pertinência do complemento de A,  $A'$  é representado pela equação 3.5:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x), x \in U \quad (3.5)$$

4. Uma relação *fuzzy*  $R$  de  $A$  para  $B$  pode ser caracterizada por uma função de pertinência  $\mu_R(x, y)$ , que satisfaz a seguinte regra composicional apresentada na equação 3.6:

$$\mu_B(x) = \max_{x \in U} \{ \min[\mu_R(x, y), \mu_A(x)] \} \quad (3.6)$$

### 3.2.3 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos de termos [18]. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média e alta. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 3.1.

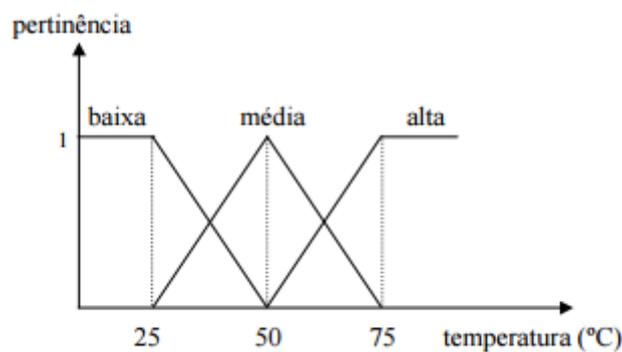


Figura 3.1-Funções de pertinência referente a variável temperatura [19].

A função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Essas variáveis podem ser consideradas como o centro da técnica de modelagem de sistemas. Com elas é possível nomear os conjuntos, e ainda classificá-los utilizando qualificadores como baixa, média e alta, assim ficando uma modelagem mais próxima do mundo real.

A utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas complexos para serem analisados através de mecanismos matemáticos convencionais.

### 3.2.4 Base de Regras

A base de regras constitui o núcleo do sistema é onde ficam armazenadas as variáveis e suas classificações linguísticas. As regras podem ser fornecidas por especialistas em forma de sentenças linguísticas ou são extraídas de dados numéricos.

Para a elaboração dessas regras é importante alguns conceitos, como: variáveis linguísticas; conexões lógicas (do tipo E/OU, para criar a relação entre as variáveis) e implicações (do tipo Se A então B), [28].

### 3.2.5 Funções de Pertinência

A função de pertinência (FP) é uma curva que define como cada ponto na entrada é mapeado para um valor de pertinência (ou grau de pertinência) entre 0 e 1 [29].

Na LF, dado um conjunto universo  $U$  e um subconjunto nebuloso  $A \subset U$ , onde  $A$  é definido por uma função de pertinência que associa a cada elemento  $x \in U$ , um grau  $\mu_A(x)$  entre 0 e 1, onde podem ser usados infinitos valores [27].

$$\mu_A(x):U \longrightarrow [0,1] \quad (3.7)$$

São diversos tipos de FP e podem ter forma padrão ou definidas pelo usuário. Seu objetivo é fazer a correspondência de um valor ou uma variável linguística em conjuntos *fuzzy* e sempre são utilizadas para a modelagem de um problema *fuzzy*. As funções de pertinências mais usadas são apresentadas a seguir.

### 3.2.5.1 Triangular

Esta função considerada a mais simples é caracterizada por três pontos formando um triângulo. A forma geral para essa função está representada na expressão 3.8 e na Figura 3.2.

$$A(x) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{x-a}{s} \right| & \text{Se } a-s \leq x \leq a+s \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.8)$$

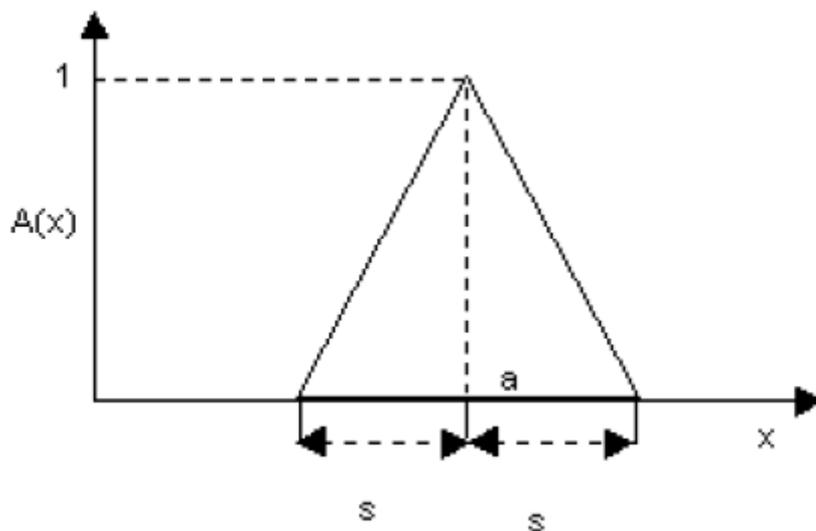


Figura 3.2 - Representação forma triangular [30].

### 3.2.5.2 Trapezoidal

As características desta FP são a simplicidade, rapidez no processamento e presença de descontinuidades. Cada elemento desta classe é caracterizado por parâmetros: a, b, c, d. A representação analítica é mostrada na expressão 3.9 e na Figura 3.3.

$$A(x) = \begin{cases} \frac{a-x}{a-b} & \text{Se } a \leq x < b \\ 1 & \text{Se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{Se } b < x \leq c \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.9)$$

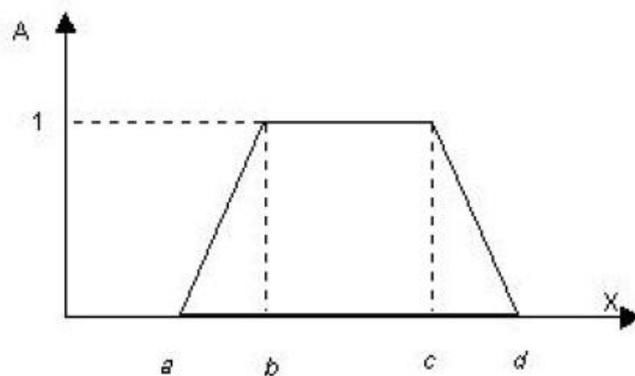


Figura 3.3 - Representação analítica trapezoidal [30].

### 3.2.5.3 Gaussiana

Na FP gaussiana quando a entrada da função após ser deslocada em relação à média tende a infinito, a resposta tende a zero. É considerado um método popular para especificar um conjunto fuzzy, devido sua suavidade e notação concisa. Essa função está definida na equação 3.10 apresentada na Figura 3.4.

$$A(x) = c.e^{-\frac{(x-a)^2}{b}} \quad (3.10)$$

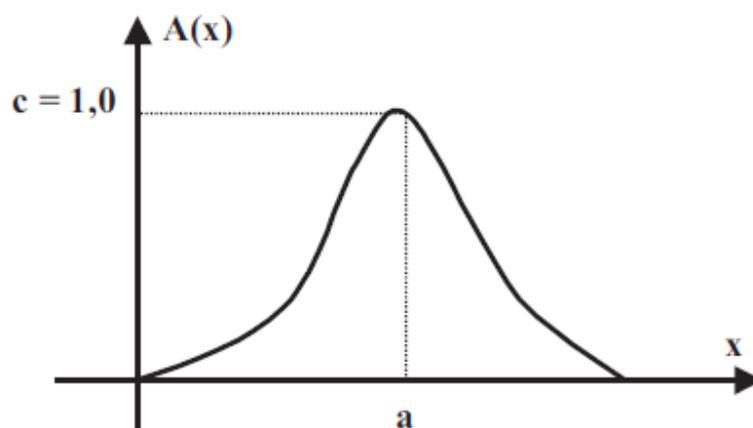


Figura 3.4- Representação da função gaussiana [31].

### 3.2.6 Inferência *Fuzzy*

A inferência é a etapa onde o raciocínio aproximativo é implementado. É através dela que é gerada a saída do sistema. Aqui é determinado como as regras são aplicadas sobre os valores de entrada já fuzzificados. Estas regras devem ser construídas com ajuda de especialista da área do problema a ser resolvido, ativadas e combinadas, representando o necessário conhecimento à tomada de decisão [27].

A tarefa de tomada de decisão é realizada em duas etapas: na primeira, as regras da base de regras devem combinar por meio de um conjunto de operações lógicas adequadas; e na segunda, essa combinação é transformada em um mapeamento de um conjunto fuzzy  $A'$  no espaço de uma entrada  $U$  em um conjunto fuzzy  $B'$  no universo de uma saída  $R$ .

## 3.3 Fuzzificação

A fuzzificação consiste em um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio fuzzy. Para que os valores absolutos possam ser processados em um sistema usando a LF, é necessário converter em valores nebulosos. O processo de transformar um valor real na sua representação fuzzy tem o objetivo de expressar como uma medida de imprecisão, denominada fuzzificação [27].

O fuzzificador é definido como um mapeamento de um ponto real  $x^* \in U \subset \mathbb{R}^n$  para um conjunto fuzzy  $Z$  em  $U$  [18]. Os critérios para um projeto de um fuzzificador

- O fuzzificador deve considerar que a entrada é um ponto não-fuzzy  $x^*$ , isto é, o conjunto fuzzy  $Z$  deve ter alto valor de pertinência em  $x^*$ .
- Caso a entrada seja corrompida por ruído, então é desejável que o fuzzificador ajude a suprimir esta ação.
- O fuzzificador deve simplificar os cálculos envolvidos, como exemplo o  $\sup_{x \in U}$ , na máquina de inferência fuzzy.

Os tipos mais comuns de fuzzificadores são: Singleton, triangular e Gaussiano.

### 3.4 Tipos de Sistemas *Fuzzy*

Os tipos mais comuns de sistemas *fuzzy* utilizados nas aplicações de inferência são: Mamdani e o Takagi-Sugeno-Kang (TSK) também conhecido na literatura como Sugeno [32]. Para este trabalho foi utilizado o sistema Sugeno que será detalhado a seguir:

#### - Sistema *Fuzzy* Takagi-Sugeno-Kang

O sistema Takagi-Sugeno-Kang ou Sugeno foi proposto em 1985 [33], e consiste em um método de inferência capaz de descrever, de forma aproximada ou exata, sistemas dinâmicos não-lineares por meio de um conjunto de sistemas dinâmicos lineares, interpolados de forma suave, não-linear e convencional [34].

O Sistema proposto por Sugeno difere do sistema *fuzzy* de Mamdani que são formados a partir de palavras, com relação na estrutura das regras SE-ENTÃO da base de regras. A substituição de uma proposição *fuzzy* por uma equação matemática na parte ENTÃO, facilita a combinação das regras *fuzzy*. Cada regra do sistema Sugeno tem a seguinte estrutura:

$$\text{Regra 1: SE } \langle x_1 \text{ é } V_1^l \rangle \text{ E } \dots \text{ E } \langle x_n \text{ é } V_n^l \rangle \text{ ENTÃO } \langle y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \dots + c_n^l x_n \rangle$$

Sendo:

- $V_k^l$  – são conjuntos *fuzzy*.
- $c_k^l$  – são constantes numéricas reais;  $K = 0, 1, 2, \dots, n$ .
- $y^l$  – saída da regra  $l$ ;  $l = 1, 2, \dots, M$ .
- $M$  – número total de regras que compõem a base de regras *fuzzy*.

Na prática, a saída  $y$  de um sistema Sugeno é uma média ponderada das saídas individuais de cada regra apresentada na equação 3.11:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M \omega^l y^l}{\sum_{l=1}^M \omega^l} \quad (3.11)$$

O valor de  $y$  é o resultado da média ponderada de cada base de regra da parte ENTÃO pelo valor global correspondente da sua premissa SE. Sendo  $\omega^l$  a representação dos pesos e são calculados na equação 3.12.

$$\omega^l = \prod_{i=1}^n \mu_{V_i^l}(x_i) \quad (3.12)$$

Takagi e Sugeno propuseram outro tipo de sistema *fuzzy* no qual as variáveis de saída são valores numéricos reais [35]. A Figura 3.5 apresenta a configuração básica de um sistema de Takagi e Sugeno.

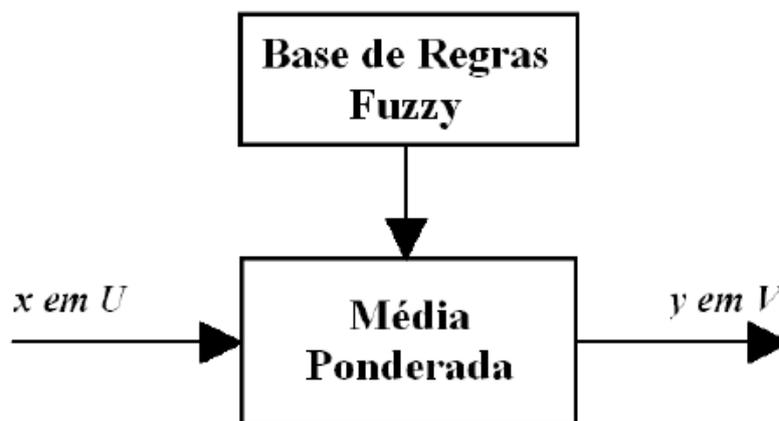


Figura 3.5 – Configuração básica de sistema fuzzy Takagi e Sugeno [35].

### 3.5 Redes Neurais Artificiais

Para melhor entendimento do funcionamento do Sistema *Neuro-Fuzzy*, nesta seção, são apresentados os fundamentos teóricos das Redes Neurais artificiais, descrevendo sua célula básica, arquitetura e processo de aprendizagem.

As Redes Neurais Artificiais (RNA's) são técnicas computacionais não lineares que apresentam um modelo matemático inspirado nas redes de

neurônios biológicos, e que adquirem conhecimento por meio de experiência ou treinamento [36]. Estas são caracterizadas por processar os dados paralelamente, da forma à que o cérebro os processa, e por utilizar o neurônio como unidade básica de processamento que é capaz de aprender e generalizar [37].

### 3.5.1 O Neurônio Artificial

O sistema nervoso é formado por um conjunto de células, chamadas neurônios que através dos sinapses controla todos os sinais e as ações de um ser vivo [27]. Os neurônios artificiais simulam os neurônios biológicos, ao receber informações e retransmitir de sensores ou de outros neurônios artificiais [38].

A estrutura do neurônio artificial que emula o neurônio biológico é composta de três partes: o dendrito, corpo e axônio [37]. O dendrito recebe o estímulo elétrico de outros neurônios e são levados ao corpo que “agrega” os estímulos, excitando ou não o neurônio. Se este receber estímulo suficiente, o corpo irá deixar com que o estímulo seja transmitido pelo axônio para que os outros neurônios ligados a ele recebam o pulso elétrico.

Na Figura 3.6 apresenta um neurônio típico com diversas entradas ( $x_i$ ), onde cada uma é multiplicada pelos correspondentes pesos ( $w_j$ ) gerando uma saída.

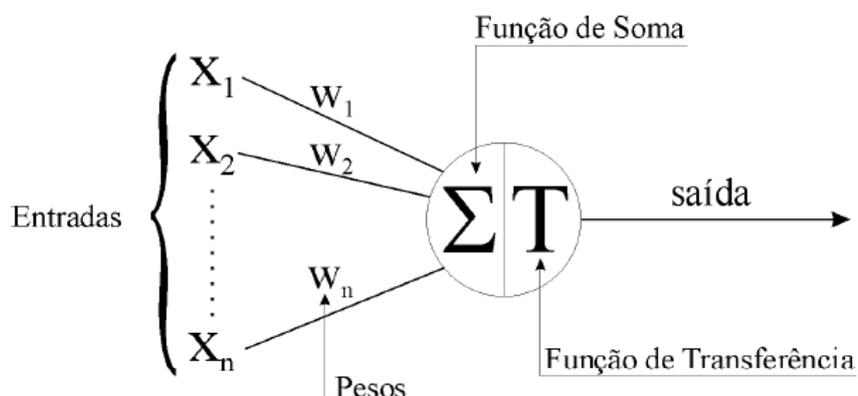


Figura 3.6- Estrutura de um neurônio artificial [39].

O neurônio é semelhante a uma função matemática que recebe valores de pulso elétrico e define uma saída. A equação (3.13) representa estrutura de um neurônio.

$$s = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i$$

(3.13)

### 3.5.2 Características Rede Neural

Entre diversas características da RNA, [40] a principal de uma rede é a generalização, que permite que depois do processo de treino e aprendizado sobre a, resolução de um problema seja possível se obter uma resposta satisfatória para uma situação semelhante e ainda desconhecida. Outra característica é a capacidade de aproximar qualquer função matemática seja ela contínua ou não. O aprendizado da rede neural é o processo de tentar encontrar a melhor função que se aproxima do resultado desejado.

### 3.5.3 Estrutura da Rede Neural

As redes neurais são organizadas em camadas, com unidades que podem estar conectadas às unidades da camada posterior [41]. A camada que inicialmente recebe os dados é chamada de entrada, a camada intermediária é chamada de oculta e a última camada é a saída. Um exemplo da organização em camadas é apresentada na Figura 3.7.

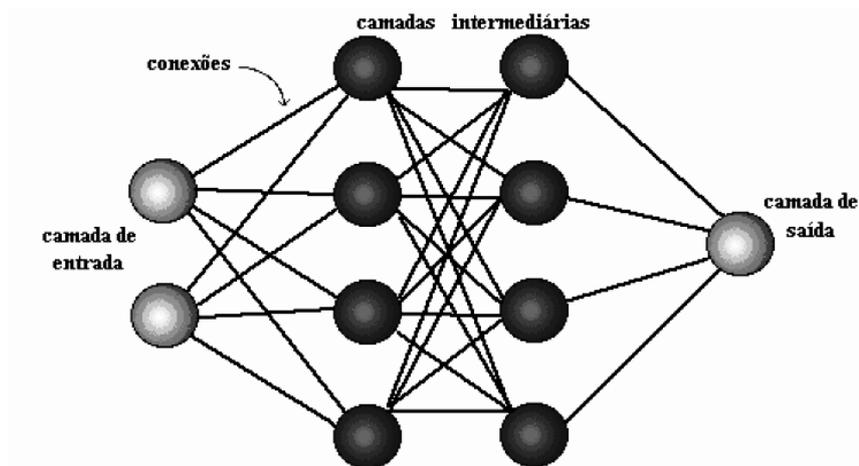


Figura 3.7- Exemplo de uma Rede Neural em Multicamadas [42].

O comportamento inteligente de uma RNA ocorre da comunicação entre as unidades de processamento da rede. Os modelos de redes neurais na sua maioria possuem regras de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados conforme os padrões de aprendizado, ou seja, as redes aprendem por meio de exemplos [43].

### 3.5.4 Arquitetura Rede Neural

As redes neurais podem ser classificadas segundo diferentes critérios, como por exemplo, a arquitetura em que foram implementadas, as topologias, as características de seus nós, as regras de treinamento e os tipos de modelos de neurônio empregado [40]. A seguir serão descritas as mais importantes.

- a) Número de camadas: uma rede neural pode ter uma ou várias camadas entre as camadas de entrada e de saída. As redes que possuem uma única camada são as que contêm um nó entre uma entrada e uma saída da rede (Figura 3.8).

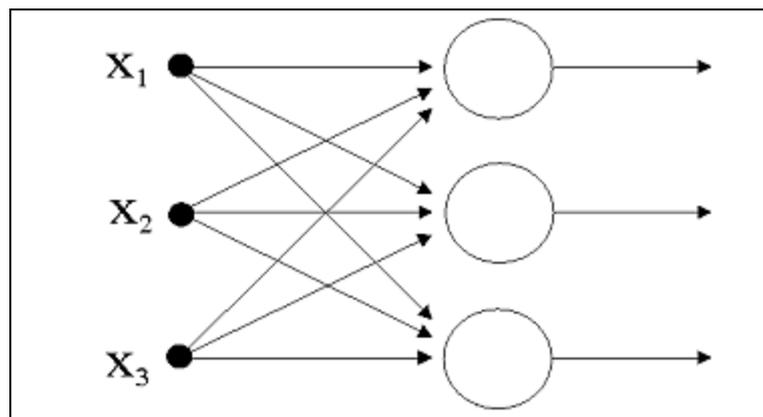


Figura 3.8- Rede Neural de uma camada [40].

As redes neurais multicamadas possuem as camadas chamadas intermediárias, *hidden* ou ocultas. Esse número de camadas pode ser indeterminado, e estão situadas entre a camada de entrada e a camada de saída da rede neural [40]. A Figura 3.9 representa a rede neural multicamadas.

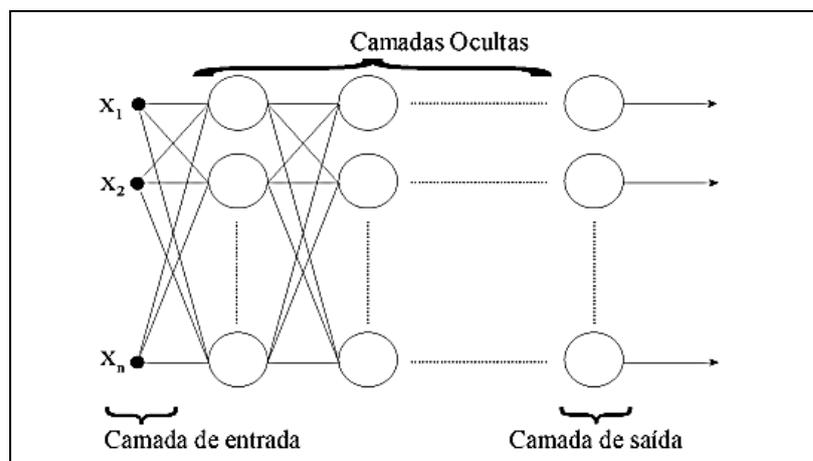


Figura 3.9- Rede Neural multicamadas [40].

- b) Tipo de conexão entre os neurônios: os nodos que compõe a rede neural artificial podem ser conexões do tipo: *feedforward* ou acíclica e *feedbackward* ou cíclica.

Na *feedforward* a saída dos neurônios de determinada camada não podem ser usadas como entrada de neurônios de camadas anteriores. Uma aplicação para estas RNA's é de desenvolver modelos não lineares que são

também usados para o reconhecimento e classificação de padrões [40]. A Figura 3.10 representa a rede neural *feedforward*.

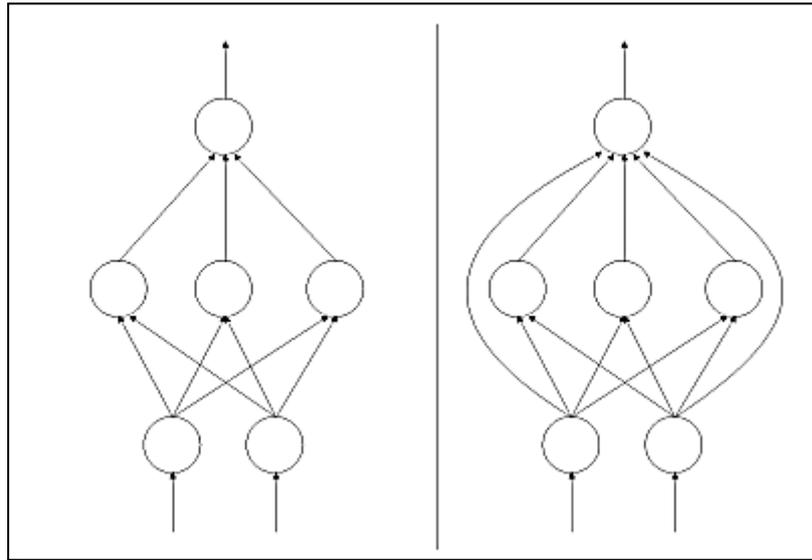


Figura 3.10- Redes Neural Artificial *feedforward* [40].

Para a *feedbackward* (Figura 3.11), a saída de neurônios de uma camada pode ser utilizada como entrada de neurônios de camadas anteriores. Se todas as ligações entre os neurônios forem com características cíclicas, a rede é chamada auto-associativa, essas associam um padrão de entrada com os neurônios, e são particularmente utilizadas para recuperar ou regenerar um padrão de entrada [40].

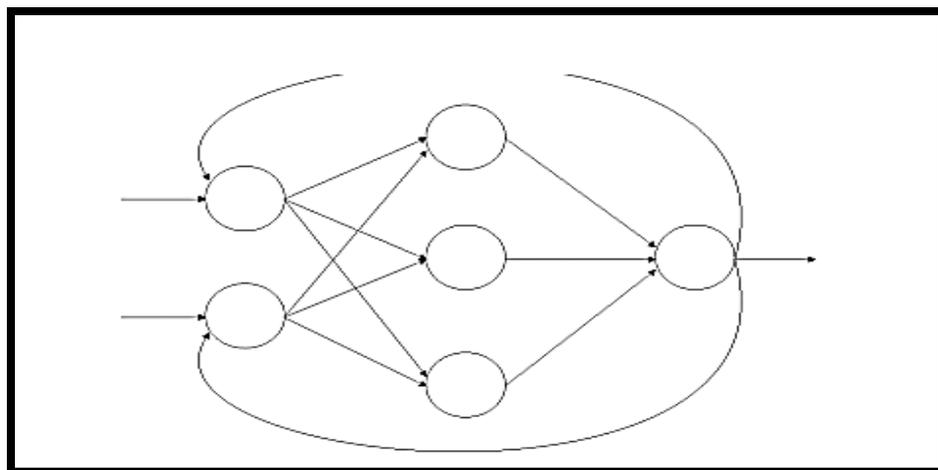


Figura 3.11- Redes Neural Artificial *feedbackward* [40].

### 3.5.5 Aprendizado

Um algoritmo de aprendizado é composto por um conjunto de regras definidas. E com o objetivo de solucionar um problema de aprendizado para determinado modelo de rede neural [44].

O aprendizado de uma RNA consiste na modificação dos pesos das conexões entre os neurônios. Diversas formas de aprendizado de redes foram desenvolvidas, seguem os principais paradigmas de aprendizado [44]:

- **Aprendizado Supervisionado:** utiliza um conjunto de treino, consistindo de entradas e suas correspondentes saídas em relação a um estímulo de entrada específico.
- **Aprendizado Não-supervisionado:** A rede atualiza seus pesos sem o uso de pares entrada-saídas desejadas e sem indicações sobre se a rede está adequada ou inadequada das saídas produzidas. A rede se auto-organiza em relação a alguns subconjuntos de entrada cujos elementos possuem características similares.

Uma RNA não fica somente no aprendizado, elas normalmente são desenvolvidas, treinadas e validadas. O treinamento de uma rede é concluído quando são atingidos os critérios de paradas. O critério de parada estabelece a iteração em que a RNA atinge uma aprendizagem que satisfaça o conjunto de padrões de treinamento. Assim, este é avaliado a partir das respostas da rede em relação ao resultado satisfatório das saídas do treino [41].

Os dois principais critérios de paradas para a realização do treinamento de uma rede são:

- As precisões, que avalia o erro de aproximação dado pela comparação entre a saída encontrada e a saída desejada. Ou seja, significa que a rede foi treinada com sucesso;
- O segundo critério é referente ao número de iterações, consiste em configurar a rede, a cada vez que todos os vetores de entrada são apresentados ao treinamento da rede, a parar quando o número de iterações programado for alcançado.

### 3.6 Sistemas *Neuro-Fuzzy*

Um Sistema *Neuro-Fuzzy* (SNF), é um tipo de sistema híbrido e constituído pela junção de duas técnicas de modelagem: as Redes Neurais (RN) e a Lógica *Fuzzy* (LF). Essa combinação de técnicas torna-se de grande interesse para diversas áreas de aplicação, como o da engenharia, pois preservam as vantagens de cada técnica e removem as desvantagens individuais das da RN e LF [45].

A Figura 3.12 apresenta um exemplo de sistema híbrido constituído de dois subsistemas: um principal, a técnica 1 (Sistemas *Fuzzy*), e outro auxiliar, técnica 2 (Redes Neurais).

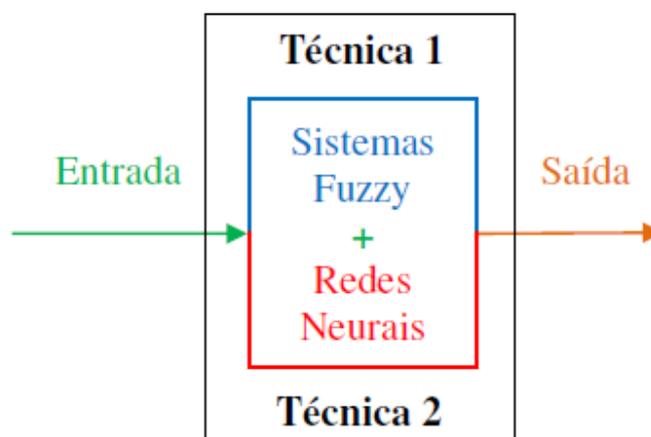


Figura 3.12- exemplo de sistema híbrido [45].

O SNF consiste de um Sistema de Inferência *Fuzzy* (FIS), numa estrutura paralela distribuída, onde os algoritmos de aprendizado das redes neurais são usados para ajustar os parâmetros do FIS.

### 3.7 *Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS)*

O *Adaptive Network Fuzzy Inference System* é um modelo de sistema *neuro-fuzzy* proposto por Roger Jan (1993) [46]. A ideia básica dessa arquitetura é implementar um sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno utilizando uma arquitetura paralela distribuída, no caso uma RNA [47].

A descrição das camadas que compõem a estrutura da rede *neuro-fuzzy* ANFIS será detalhada a seguir. A Figura 3.13 apresenta a estrutura das camadas de um Sistema *Neuro-Fuzzy*.

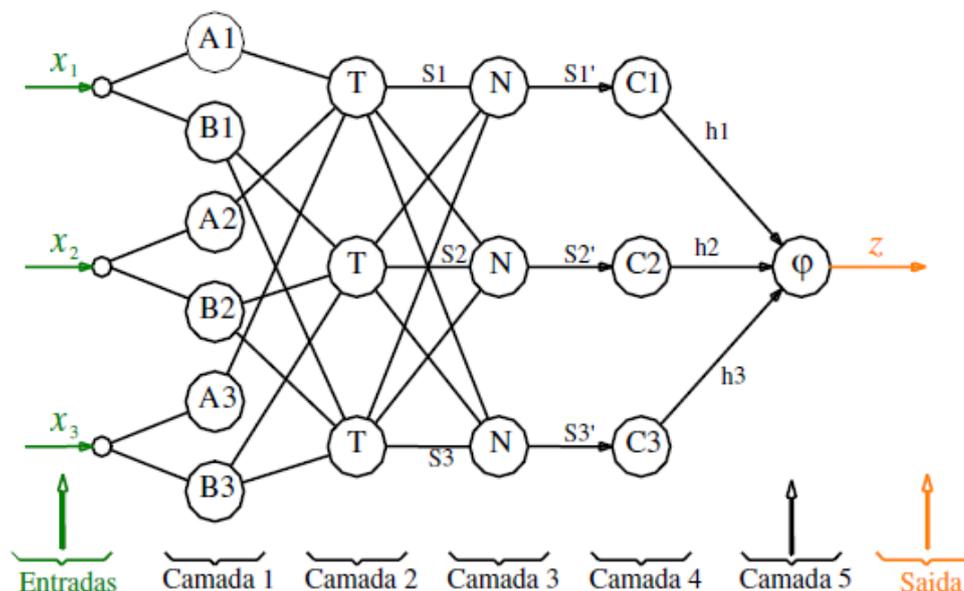


Figura 3.13: arquitetura básica de um SNF [45].

- Camada 1: esta camada representa as variáveis de entrada, as quais são normalizadas e escalonadas dentro do intervalo  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$ . A saída desta camada são os graus de pertinências das entradas, baseados na premissa de cada regra. Neste caso, cada entrada possui apenas duas funções de pertinência ( $A1 = \text{Alto}$  e  $B1 = \text{Baixo}$ ) [48].
- Camada 2: a segunda camada é a etapa de execução da parte “SE” das regras do sistema *Fuzzy* de Sugeno. Nesta etapa, os intervalos de cada variável de entrada são divididos em diversos níveis (Baixo, Médio e Alto), os quais indicam os pesos da rede para cada entrada. Cada nó ou neurônio corresponde a uma regra e calcula com que grau de pertinência o consequente da regra está sendo atendido.

A camada 2 é regida pela equação 3.14 onde (\*) que corresponde a operação  $t\_norma$ , [48].

$$\begin{aligned}
 S_1 &= A_1(x_1) * A_2(x_2) * A_3(x_3) \\
 S_2 &= B_1(x_1) * B_2(x_2) * B_3(x_3) \\
 S_3 &= B_1(x_1) * B_2(x_2) * B_3(x_3)
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

- Camada 3: a terceira camada é definida pelas regras do FIS e realiza a normalização dos graus de ativação das regras. Cada nó desta camada executa a função normalização, a qual é utilizada como um pré-processamento para a defuzzificação, como mostra a equação 3.15 [48]:

$$\begin{aligned} S'_1 &= \frac{S_1}{(S_1 + S_2 + S_3)} \\ S'_2 &= \frac{S_2}{(S_1 + S_2 + S_3)} \\ S'_3 &= \frac{S_3}{(S_1 + S_2 + S_3)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

- Camada 4: nesta camada, a saída de cada neurônio é calculada pelo produto da saída normalizada da camada anterior e o valor de ativação do consequente. Este valor de saída é dado segundo a equação 3.16 [48].

$$\begin{aligned} h_1 &= S'_1 \cdot C_1 \\ h_2 &= S'_2 \cdot C_2 \\ h_3 &= S'_3 \cdot C_3 \end{aligned} \quad (3.16)$$

onde  $C_i$ 's correspondem aos valores dos consequentes

- Camada 5: a camada de saída determina o resultado, regido pela equação 3.17, em que se calcula o valor numérico de saída do sistema ANFIS. Esta etapa é facilitada pelo cálculo das camadas 3 e 4, realizadas nas etapas anteriores [49]:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\sum S_i \cdot f_i}{\sum S_i} = \sum S'_i \cdot f_i \\ Z &= h_1 + h_2 + h_3 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Resumindo a ideia principal do sistema ANFIS é implementar um sistema de inferência *Fuzzy* com uma rede neural, em que geralmente as funções de pertinência utilizadas são do tipo sigmoides ou gaussiana. A aplicação do sistema ANFIS está disponível no *Fuzzy Logic Toolbox* do programa computacional MATLAB [50].

### 3.8 Considerações Finais

Neste capítulo, foram introduzidos os conceitos inerentes à lógica *fuzzy*, que tem aplicação na solução de problemas reais, principalmente quando se trabalha com grandezas que não podem ser mensurados e quantificados com precisão.

A fundamentação de conceitos para os sistemas híbridos, como o sistema *Neuro-Fuzzy* foi abordada como um método de modelagem. A técnica de controle baseada em Lógica Fuzzy e a RNA são aplicadas em diversas áreas com desempenho satisfatório.

No que diz respeito à lógica *fuzzy* em tomada de decisão, existe uma grande aplicabilidade desta por se assemelhar à forma humana de raciocinar e tomar decisões, pois, no lugar de equações matemáticas, a lógica difusa usa descrição linguísticas no auxílio do especialista que se concentra nos objetivos funcionais.

## 4 FUNDAMENTOS DA REDE LTE

### 4.1 Introdução

O *Long Term Evolution* (LTE) é uma das tecnologias móvel de transmissão de dados em redes de celular mais avançada do momento que foi criada com base no GSM e WCDMA.

Devido ao desenvolvimento de aplicativos e a crescente demanda dos usuários que utilizam recursos e largura de banda maiores, o LTE consegue proporcionar transmissão mais rápida de dados e proporciona ao usuário a melhor experiência em relação a conectividade móvel.

Este capítulo apresenta o sistema celular de quarta geração LTE, abordando sua estrutura e principais características que faz desta tecnologia a evolução das redes celulares.

### 4.2 História da Rede LTE

Ao longo das últimas duas décadas a forma como as pessoas se comunicam, se informam e se divertem, tem mudado com a evolução tecnológica. As exigências do serviço de comunicações sem fios de banda larga móvel e com o surgimento de novas aplicações e multimídia constituem a motivação para o desenvolvimento de tecnologias de acesso de banda larga nos últimos anos.

As metas de desempenho, capacidades, complexidade, implantação e arquitetura da tecnologia LTE foram definidas pela *3rd Generation Partnership Project* [51] e documentadas no *release 8*. As principais medidas de desempenho do sistema são enumeradas a seguir.

- Taxa de transferência média, como a média dos usuários em MHz;
- Rendimento de usuário de ponta, medido por MHz nos 5% da distribuição de usuários (95% dos usuários com melhor desempenho);
- Eficiência do espectro, que indica o rendimento do sistema por setor em termos de bps/MHz.

### 4.3 Arquitetura da Rede LTE

Com uma arquitetura simplificada e interfaces abertas, o LTE tem o núcleo *Evolved Packet Core* (EPC). Esta arquitetura é modelada para possibilitar a integração com outras redes de comunicação com base no protocolo IP (Internet Protocol). Utilizando-se a comutação por pacotes, permite a conectividade com outras formas de acesso, incluindo as padronizadas pelo 3GPP como exemplo as DSL que utilizam banda larga fixa.

A utilização do protocolo IP cria a possibilidade de se intensificar a convergência entre serviços. Viabiliza aplicações em tempo real e maior nível de mobilidade e possibilita com que o usuário transite entre a rede móvel e a rede fixa.

Para que o sistema LTE pudesse disponibilizar melhor serviço para o usuário como exemplo: altas taxas de transmissão de dados tanto para upload quanto para download, eficiência espectral, mobilidade entre outros, foi necessário criar uma nova estrutura no núcleo de rede e na rede de acesso.

A rede de acesso denominada *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), constitui-se pelo terminal móvel e pela eNodeB (*Evolved NodeB*) e o núcleo de rede denominado *Evolved Packet Core* (EPC), constituído pela *Mobility Management Entity* (MME), o *Serving Gateway* (S-GW) e o *Packet Data Network Gateway* (P-GW), sendo que estes dois últimos compõem o *System Architecture Evolution Gateway* (SAE-GW) [52]. E com a E-UTRAN e o EPC formam a nova estrutura o *Evolved Packet System* (EPS) apresentada na Figura 4.1.

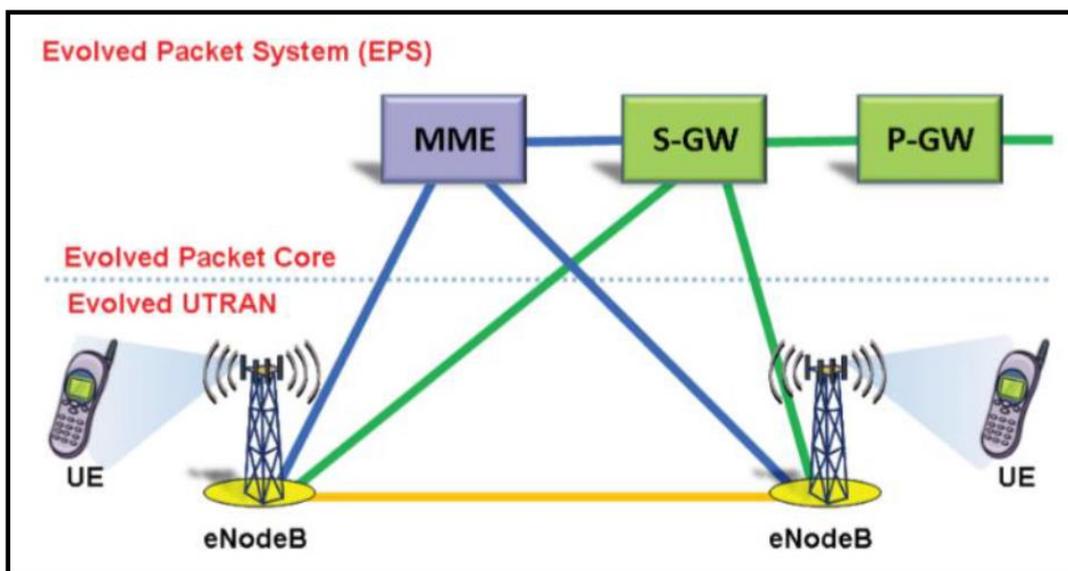


Figura 4.1- Arquitetura rede LTE [6].

### 4.3.1 Redes de Acesso E-UTRAN

O E-UTRAN é a rede de acesso e possui apenas um componente o eNodeB que passou a substituir as funções do *Radio Network Controller* (RNC) e conecta-se ao núcleo de rede.

Os eNodeBs são interligados entre si através da interface X2 Figura 4.2 de forma a estes se comunicarem entre si eliminando desta forma uma grande quantidade de fluxo de dados nos RNC's [53]. Algumas principais funcionalidades das eNodeBs:

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

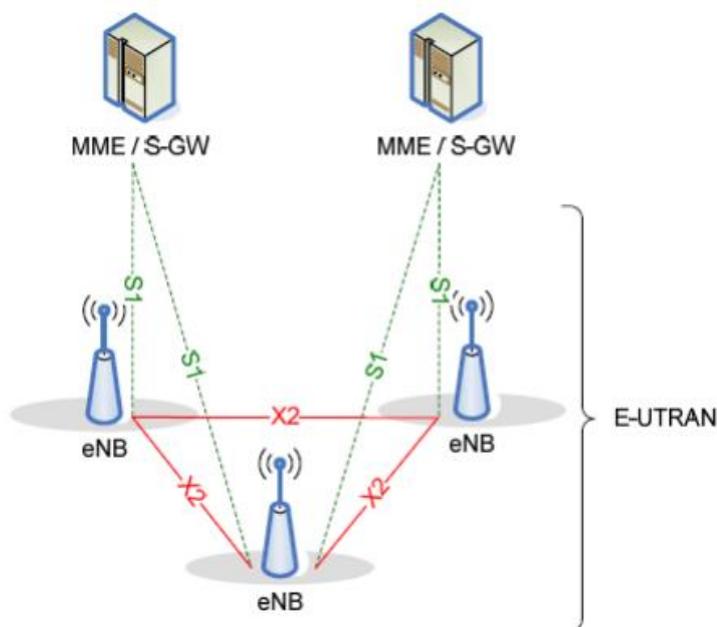


Figura 4.2: Arquitetura Geral E-UTRAN [54].

### 4.3.2 Núcleo de Rede *Evolved Packet Core* (EPC)

O EPC é o núcleo de rede LTE responsável pelo controle global do UE e projetado para fornecer serviço de conectividade IP. Por meio da arquitetura de rede otimizada, que ofereça altas taxas de transmissão de dados, serviços em tempo real com melhor qualidade e desempenho para o usuário [55]. Os principais elementos de rede do EPC são *Mobility Management Entity* (MME), *Serving Gateway* (S-GW) e *PacketData Network Gateway* P-GW).

#### 4.3.2.1 *Mobility Management Entity* (MME)

O MME trata da sinalização e controle, a gestão da mobilidade e o modo inativo manipula a distribuição da paginação das mensagens para o eNodeB. É responsável pela função do plano de controle para permitir a mobilidade contínua entre o LTE e redes móveis GSM e UMTS e também suporta as interceptações legais de sinalização [52], [56]. As atividades principais que o MME realiza são:

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

#### 4.3.2.2 **Serving-Gateway (S-GW)**

O S-GW, atua como o elemento de terminação entre a rede de acesso rádio (E-UTRAN) e a rede *core*. Encaminha os pacotes de dados para o eNodeB e o P-GW e realiza a contabilização e o controle dos dados, atua também como âncora de mobilidade local para os *handovers* entre eNodeBs ou para a passagem entre redes 3GPP e informa o tráfego dos dados no caso de interceptação legal [56]. Segue principais características.

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

#### 4.3.2.3 **Packet Data Network Gateway (P-GW)**

O P-GW, é responsável pela conectividade entre a rede LTE e as redes de dados em pacotes externos, sendo o ponto de entrada e saída de tráfego de dados o móvel [57]. O P-GW realiza a execução de políticas através da aplicação das regras definidas pelo operador para a atribuição e utilização de recursos, faz a gestão da atribuição de endereços IP, suporta a filtragem de pacotes para cada utilizador e oferece suporte à tarifação e serve de âncora para a mobilidade entre redes 3GPP e redes não 3GPP [52].

## 4.4 Princípios da Interface Aérea LTE

Os princípios de interface aérea LTE tratam da descrição das técnicas de interface de rádio utilizadas no *uplink* e *dowlink* considerando os princípios de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a sua estrutura de canais de interface de ar.

A interface aérea LTE utiliza duas diferentes técnicas de acesso múltiplo, as quais são baseadas em OFDM que possibilita alta velocidade na transmissão de dados, com uma implementação de baixo custo e eficiente no consumo de energia. As técnicas são: [58].

- OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).
- SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*).

### 4.4.1 OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

A OFDMA é o esquema de transmissão de dados da interface aérea utilizado para o *dowlink* em LTE, a largura de banda é dividida em unidades menores conhecidas como “*subcarriers*” e são agrupadas e alocadas como um recurso a um dispositivo, sendo estes recursos diferentes no tempo e no domínio da frequência [59]. A Figura 4.3 representa a visão básica da OFDMA.

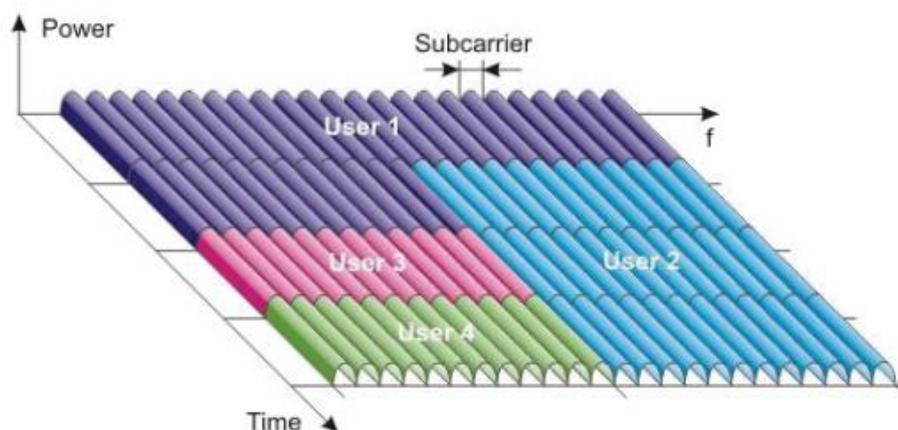


Figura 4.3: Visão básica OFDMA [59].

#### 4.4.2 SC-FDMA – *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*

Esse esquema de transmissão de dados utilizado para o *uplink* em LTE, consiste em transmitir dados de uma forma sequencial através de uma única portadora. O SC-FDMA tende combinar melhores características dos sistemas de portadora única, com baixa relação de potência no parâmetro PAPR (*Peak to Average Power Ratio*), [59] assim com consumo reduzido de energia. Aumenta a vida útil da bateria e diminui a necessidade de transmissores complexos. Na Figura 4.4 mostra a comparação entre OFDMA e SC-FDMA.

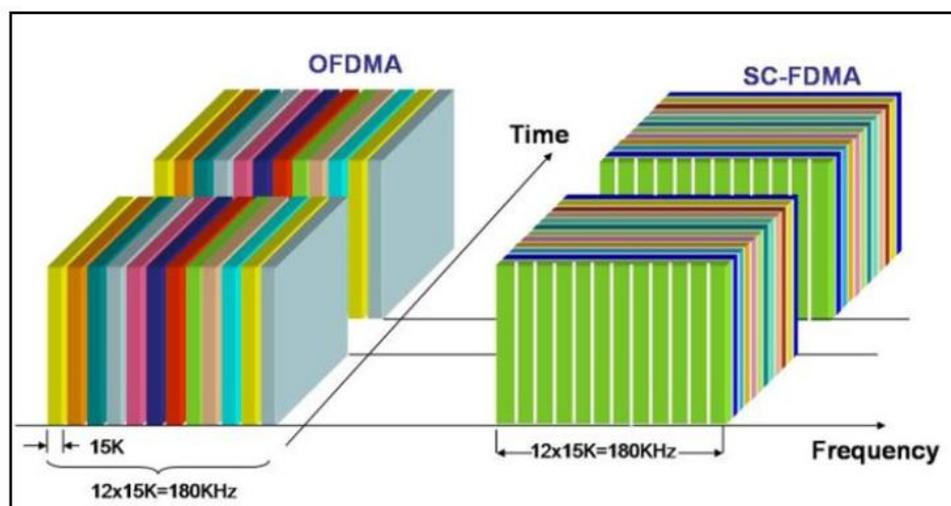


Figura 4.4: Comparação entre OFDMA e SC-FDMA [60].

#### 4.5 Múltiplas Antenas

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), é um sistema para a tecnologia LTE onde o uso de múltiplas antenas no transmissor e receptor enviam dados por diferentes caminhos, ocupam a mesma banda de rádio frequência, levam ao mesmo tempo, altas taxas de transferências [59].

O sistema de antenas MIMO oferece grande confiabilidade e capacidade para os serviços de banda larga móvel e, corresponde a um mecanismo eficiente por desviar dos limites impostos por Shannon.

A Lei de Shannon impõe um limite à quantidade de informação que pode ser transmitida em um canal de comunicação, devido à presença de ruído [61].

O diferencial da técnica MIMO se baseia no fato de que a Lei de Shannon é aplicável a um único canal de transmissão. Como o sistema MIMO cria vários canais entre emissor e receptor, cada canal individualmente fica limitado, porém o conjunto de canais excede tal limite. A Figura 4.5 apresenta um sistema MIMO 2x2, com duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras de sinal.

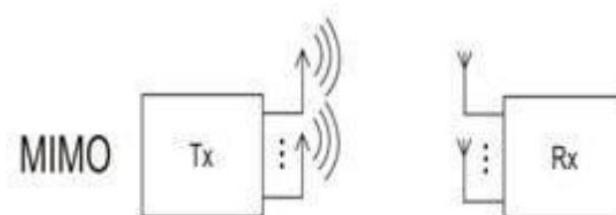


Figura 4.5: Representação MIMO2x2 [62].

## 4.6 Flexibilidade do Espectro

A flexibilidade no uso do espectro é uma das principais características da tecnologia LTE, que além de ser resistente à interferência entre as células, também se mostra eficiente em todo o espectro disponível. A flexibilidade desta aplicação permite o aumento no número de usuários por célula na rede em comparação com WCDMA [61].

O suporte à FDD (*Frequency Division Duplex*), em razão de fazer uso de duas faixas de frequências distintas e à TDD (*Time Division Duplex*) por utilizar uma única faixa de frequência na mesma plataforma, garante o aproveitamento de diferentes técnicas com o espectro.

De acordo com especificações do 3GPP, o espectro para LTE já está disponível em diferentes bandas de frequência em países diferentes, observando-se as regionais ou globais comuns.

Por exemplo, nos Estados Unidos da América, os primeiros testes foram para a banda dos 700 MHz, em substituição do sinal analógico de televisão. Na Europa, os operadores de telecomunicações acordaram utilizar a banda de frequências 2.5-2.6 GHz. Porém, devido escassez do espectro, também acordaram fazer uma política de reorganização do LTE nas bandas do GSM 900 (900 MHz) e 1800 (1800 MHz) [63], apoiados em uma norma aprovada pela Comissão Europeia para a utilização das bandas do GSM em outras tecnologias de comunicações móveis. A utilização de frequências mais altas continua a ser pesquisada, devido à disponibilidade de maiores bandas no espectro. Contudo o problema de propagação para as comunicações móveis ainda encontra barreira para esses avanços. Neste trabalho será abordado a banda para LTE de 1800MHz.

#### **4.6.1 LTE 1800MHz**

A banda 3 LTE 1800 MHz já está sendo usada em muitas cidades do Brasil. No entanto, ainda enfrenta significativa fragmentação do espectro, como 1800 MHz e representa menos da metade das redes de banda única ou multi-banda [64]. Operadores de telecomunicações têm várias motivações para a implantação de LTE 1800 MHz, pois a área de cobertura é duas vezes maior se comparada à outras implementações, por exemplo a 2,6 GHz.

A vantagem de implementar o LTE 1800 MHz em relação ao 2,6 GHz já utilizados, é a capacidade de cobertura. Com uma frequência mais baixa, possui maior penetração de sinal, aspecto importante para a cobertura de ambientes internos. Unida aos 900 MHz, a frequência de 1800 MHz é utilizada no Brasil em redes 2G (GSM). O ponto negativo desse compartilhamento é que o espectro se torna limitado, uma vez que a frequência precisaria suportar tanto a rede 2G como a 4G.

A capacidade de *refarming*, ou seja, a reorganização da frequência existente no espectro em 1800 MHz para implementar a tecnologia LTE é mais eficiente ao ar livre. E a capacidade de banda larga móvel dentro das áreas indoor suporta mais clientes com uma melhor experiência do usuário,

especialmente quando sua disponibilidade é levada em conta ou novas faixas de espectro ainda não disponíveis.

A banda 3 LTE 1800 MHz é ideal para implantações de LTE por seu desempenho de propagação RF (Rádio Frequência), ampla disponibilidade e alocação para serviços móveis e comerciais.

## **4.7 Considerações Finais**

Neste capítulo foi abordado o histórico do LTE e apresentado uma arquitetura simplificada dos principais componentes e seu funcionamento como importante para a comunicação das redes móveis.

Foi apresentada a interface aérea do LTE e, por fim, a flexibilidade no uso do espectro, que é uma característica de fundamental importância para estabelecer parâmetros para implementação do LTE que possibilite aumentar a transmissão de dados, capacidade e cobertura de uma rede móvel.

## 5 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS

### 5.1 Introdução

Os modelos de propagação são elaborados com um dos objetivos de obter a predição da propagação de um determinado ambiente com características particulares. Se um modelo é usado em um local com características diferentes, ele pode perder a precisão para o qual foi elaborado. Por exemplo, para área urbana densa, para área de floresta etc. Estas características do ambiente exercem forte influência no sinal propagado.

Neste capítulo descreve-se o ambiente analisado, a cidade de Castanhal no Estado do Pará, a aquisição dos dados, os equipamentos e suas funcionalidades na realização da campanha de medição.

### 5.2 Caracterização do Ambiente

A cidade de Castanhal considerada modelo, está a 65 quilômetros de Belém estado do Pará. É cortada pela rodovia federal BR-316, principal via de ligação entre a capital paraense e as regiões brasileiras, e indispensável para o escoamento da produção. Possui área territorial de 1.028,889 Km<sup>2</sup> e uma população em média de 173 mil habitantes [65]. A Figura 5.1 mostra a localização no mapa de Castanhal.



Figura 5.1: Mapa de Castanhal [65].

Na região de Castanhal, o clima é equatorial [66]. A área com vegetação é encontrada na maioria na área rural e quantidade maior de prédios médios na área central da cidade. Estas árvores são de pequeno porte e são dispostas aleatoriamente nas avenidas ou em grande densidade, em áreas junto com outras espécies de vegetação, como nos parques e museus.

Para essa dissertação, a campanha de medição foi realizada em rotas na região do município de Castanhal, no mês de janeiro de 2016. A maioria das medições ocorreram em ambiente ensolarado ou nublado, clima da região amazônica. A Figura 5.2, mostra uma das avenidas do centro de Castanhal, região comercial no momento do teste.



Figura 5.2: Região no centro de Castanhal.

### 5.3 Coleta de Dados

Foram realizadas medições LTE, de nível de sinal na faixa 1800MHz, nas vias centrais da cidade de Castanhal, as quais possuem configuração de prédios de altura mediana e com densidade média de vegetação. A escolha desta localidade foi devido a ela ser uma das primeiras cidades do interior próximas da capital paraense a utilizar a frequência de 1800MHz para o LTE.

Os testes foram realizados a partir de antenas da operadora de comunicações móveis, os *sites* dessa operadora apresentam configuração

padrão, com antenas setorizadas, cada uma direcionada para um azimute específico, com a finalidade de atender a uma determinada região. A somatória das antenas deve cobrir uma área de 360° do *site*. A Figura 5.3 mostra uma das antenas em Castanhal.



Figura 5.3: Exemplo de uma das antenas na localidade.

As antenas implantadas nos setores demonstradas neste trabalho são de vários modelos conforme Tabela 5.1, possuem potência de 20W e operam na faixa de frequência de 1.710 MHz até 1.900 MHz. A altura de instalação do sistema irradiante varia de acordo com a região que será atendida, podendo chegar a altura superior a 100 metros. No caso estudado, as alturas de instalação das antenas variam de 36.5 a 95 metros.

Tabela 5.1- Especificações das Antenas

Antena por setor	Modelo Antena	Ganho_Antena (dBi)	Altura_Antena (m)
01A	741 794_1710_1880	18,5	56.5
01B	741 794_1710_1880	18,5	56.5
01C	DBXLH-6565A-VT_1710_1880	16,5	56.5
02A	HBXX-9014DS-VTM_1710_1880	16	36.5
02B	HBXX-9014DS-VTM_1710_1880	16	36.5
02C	739 710_1710_1880	17,5	36.5
03A	741 794_1710_1880	18,5	50
03B	742 212_1710_1880	17,5	50

03C	741 794_1710_1880	18,5	50
04A	APXV18-209014-C_1710_1880	16,5	95
04B	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	80
04C	HBXX-9014DS-VTM_1710_1880	16	95
05A	APXV18-276516-C_1710_1880	16,9	57
05B	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	57
05C	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	57
07A	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	57
07B	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	57
07C	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	57
09A	APXV18-206516L_1710_1900	17,6	40
09B	APXV18-206516L_1710_1900	17,6	40
09C	APXV18-206516L_1710_1900	17,6	40
10A	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
10B	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
10C	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
11A	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
11B	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
11C	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
12A	HBXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	50
12B	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	50
12C	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	50
13A	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
13B	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
13C	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	40
15A	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	50
15B	HWXX-6516DS-VTM_1710_1880	17,6	50
15C	HBX-6516DS-VTM_1710_1880	17,75	50

## 5.4 Configuração do Receptor

As rotas percorridas a maioria pelas vias da região central do município, foram realizadas medindo o nível de sinal da operadora, com um *smartphone* da marca Samsung, modelo Galaxy J5 *Duos* e antena de ganho de 0 dB, em regiões atendidas pela tecnologia LTE. Os dados recebidos da coleta foram posteriormente tratados e analisados.

O aplicativo utilizado nos testes para celular denomina-se *G-NetTrack* [67], qual funciona em conjunto com o GPS (Global Positioning System) do celular. A Figura 5.4 ilustra a interface do aplicativo

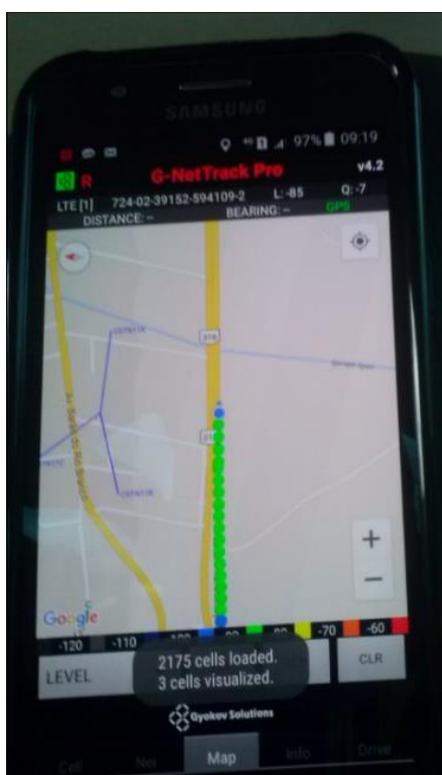


Figura 5.4 – Interface do aplicativo *G-NetTrack* [67].

Antes de iniciar as aferições, foi necessário configurar o aparelho celular. O receptor foi configurado para o modo automático, não tendo que ficar obrigatoriamente acampado na tecnologia em estudo, devido à localidade no período do teste ter somente a frequência 1800MHz para o LTE.

As informações de rede capturadas com aplicativo utilizado foram: nível de sinal que chega do aparelho do usuário, potência, níveis de interferências, taxas de dados no *upload* e no *download*, coordenadas geográficas entre outras informações de parâmetros de rede.

Para este trabalho foram utilizadas apenas as informações de coordenadas geográficas, para posterior conversão em distância, e nível de sinal e de interferência. A Figura 5.5 apresenta alguns dados de rede coletadas no *G-NetTrack*.



Figura 5.5 – Dados de rede coletados no *G-NetTrack*

## 5.5 Configuração das Rotas

As medições foram realizadas, por um grupo de três pessoas, o condutor do veículo, a responsável pela localização das vias e uma pessoa para coletar os dados com o celular.

A distribuição dos pontos medidos está representada por avenidas, de modo a cobrir a maior parte da região central de Castanhal. O teste foi realizado em quatro avenidas consideradas as principais da localidade.

A configuração padrão de um transmissor em *sítes* de comunicações móveis constitui-se em a torre possuir antenas setorizadas, cada uma responsável em atender uma região específica. Os dados da coleta foram armazenados em arquivos txt na memória interna do celular, onde o nível de sinal de cada setor foi separado e, posteriormente, foram pós-processadas.

As avenidas da rota possuem quantidade de pontos diferentes, pois dependendo delas, o sinal de cobertura do transmissor alterava-se com aproximação ou distanciamento das antenas.

A Figura 5.6 mostra uma imagem captada pelo software de georreferenciamento denominado *Google Earth* [68], onde mostra as rotas em linhas mais espessas e coloridas da coleta de dados.



Figura 5.6 - Rota realizada em Castanhal.

Para tratar melhor os dados coletados, as rotas foram divididas em quatro conforme tabela 5.2. A rota escolhida para os primeiros testes foi a rota 01, com quantidade suficiente de amostras a ser utilizadas, para comparar modelos de perda de propagação por meio do sistema *Neuro-Fuzzy*.

Tabela 5.2. Rota teste de Castanhal

<b>Rota</b>	<b>Avenida da coleta dos dados</b>	<b>Site</b>	<b>Total amostras</b>
01	Rodovia Bernardo Sayão/ Av. Presidente Getúlio Vargas.	01,02,03,04,07,09,10,11	829
02	Av. Maximino Porpino.	03,05,07,12	239
03	Rua Pedro Porpino da Silva.	04,12,13	245
04	Av. Barão do Rio Branco.	02,03,07,10,11,15	208

## **5.6 Considerações Finais**

Neste capítulo apresentou-se a metodologia de aquisição de dados, a configuração das rotas, receptor e aspectos levados em consideração para disposição dos pontos de medição, procedimentos e tratamento de dados.

## **6 METODOLOGIA PARA TRATAMENTO DOS DADOS E OBTENÇÃO DOS RESULTADOS**

### **6.1 Introdução**

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, que pode ser dividida em duas fases: tratamento dos dados e aplicação, e configuração do *Adaptative Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS).

Após a obtenção dos dados, foi necessário realizar o tratamento dos dados a fim de extrair conhecimento e transformá-los em informação. Para tanto, é necessário organizar e manipular esses dados de forma coerente, tendo em vista colocar em ordem ou simplesmente converter um arquivo para os diferentes tipos de formatos digitais. Essa conversão visa a manter de modo consistente e fiel aos dados originais, podendo assim ser utilizados.

A aplicação e configuração utilizada no *Adaptative Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS), mostra como os parâmetros do sistema Neuro-Fuzzy foram ajustados, para a execução das tarefas de treinamento da rede neural artificial, bem como a criação do FIS (Sistema de Inferência Fuzzy).

### **6.2 Tratamento de Dados**

Os dados brutos obtidos através da campanha de medições foram três: potência do sinal em dBm, as coordenadas decimais dos pontos de medições e a relação sinal ruído. Sendo assim, houve a necessidade de converter potência recebida em perda de propagação, além de calcular a distância entre dois pontos (transmissor/receptor) utilizando-se as coordenadas decimais, para que fosse possível a inserção destes parâmetros no ANFIS.

#### **6.2.1 Cálculo da Perda de Propagação**

Por conveniência, a potência do sinal recebido foi transformado em perda de propagação, para que fosse possível comparar os valores obtidos na saída do ANFIS com os modelos de perda de propagação existentes na literatura

científica. Esta tarefa foi realizada com a aplicação da equação 6.1 de balanceamento de *link* (*Link budget*), o que resultou na contabilidade de todos os ganhos e perdas do transmissor, através do meio (espaço livre, cabo, guia de ondas, fibras, etc.) para o receptor em um sistema de telecomunicações como é mostrado na Figura 6.1.

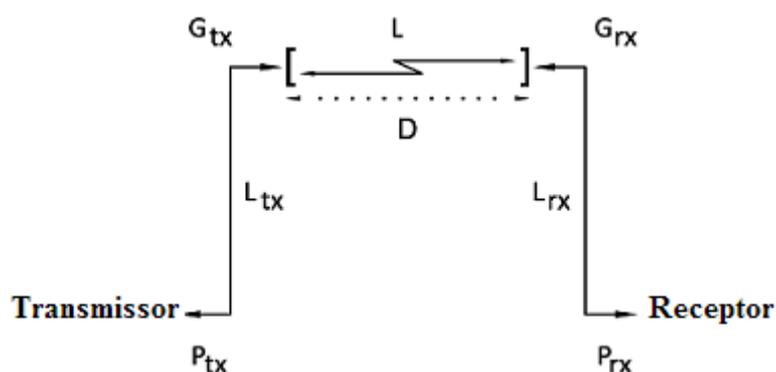


Figura 6.1: Ilustração básica de um sistema de telecomunicação [69].

Equação Geral (SAUNDERS, 1999) [12]:

$$L = P_{tx} - P_{rx} + G_{tx} + G_{rx} \quad (6.1)$$

Sendo:

- $L$  - Perda de Propagação (margem de desvanecimento, perda de corpo, de incompatibilidade de polarização, outras perdas ...) (dB).
- $P_{tx}$  - Potência de saída do transmissor (dBm)
- $P_{rx}$  - Potência recebida (dBm)
- $G_{tx}$  - Ganho da antena do transmissora (dBi)
- $G_{rx}$  - Ganho da antena receptora (dBi)

## 6.2.2 Cálculo da Distância Entre Dois Pontos

Para realizar o cálculo da distância entre dois pontos, foram utilizadas as coordenadas geográficas obtidas com o GPS, sendo assim possível calcular a distância entre o transmissor e o receptor.

Na Figura 6.2, o planeta terra é representada como uma esfera, com o polo norte e equador marcados. Dois pontos P1 e P2 são colocados na superfície da esfera com suas respectivas coordenadas. O  $\phi_1$  é a latitude geográfica do P1 e o  $\phi_2$  é a latitude geográfica do P2 e  $\Delta\lambda$  a diferença entre suas longitudes. Logo é possível encontrar o arco **S** unindo os dois pontos [70].

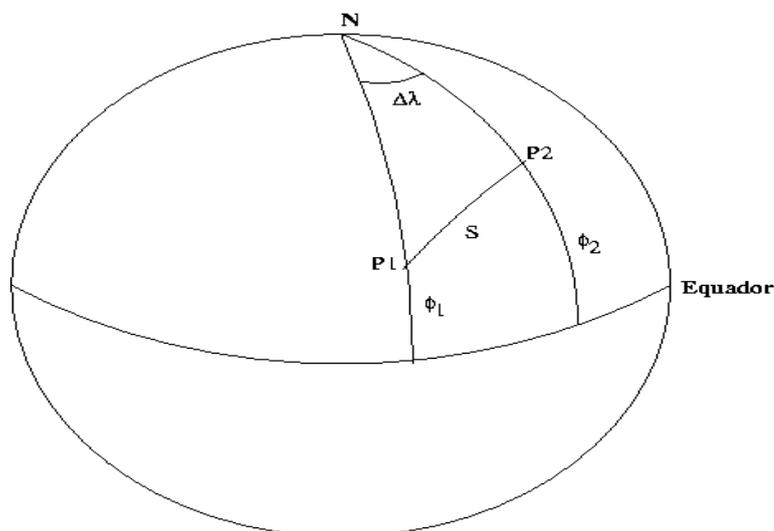


Figura 6.2 - Esquema do cálculo entre dois pontos da superfície terrestre [70].

Através da lei dos cossenos, da trigonometria esférica, o arco S é dada pela equação 6.2 [70].

$$\cos(S) = \sin(\phi_2)\sin(\phi_1) + \cos(\phi_2)\cos(\phi_1)\cos(\Delta\lambda) \quad (6.2)$$

Sabendo as coordenadas geográficas de dois pontos, descobrimos seu arco em radianos para finalmente multiplicarmos pelo raio da terra (6.371 Km) e conheceremos a distância linear entre estes pontos.

Após o tratamento desses dados citados anteriormente, foi possível obter informações suficientes para a inserção no sistema *Neuro-Fuzzy*.

### **6.3 Descrição da Configuração do *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFINS)**

O sistema ANFIS foi desenvolvido no software *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB, utilizando-se a função *anfisedit*, composto da seguinte maneira: duas

entradas com os parâmetros, distância entre o transmissor e o receptor em Km, e a relação sinal ruído. Essas entradas foram associadas a fim de gerar uma saída, no caso perda de propagação dada em dB, como é mostrado na Figura 6.3. Sendo assim, foi realizado uma abordagem “Por Radiais” que relaciona os pontos de diferentes ERBs ao decorrer de uma avenida.

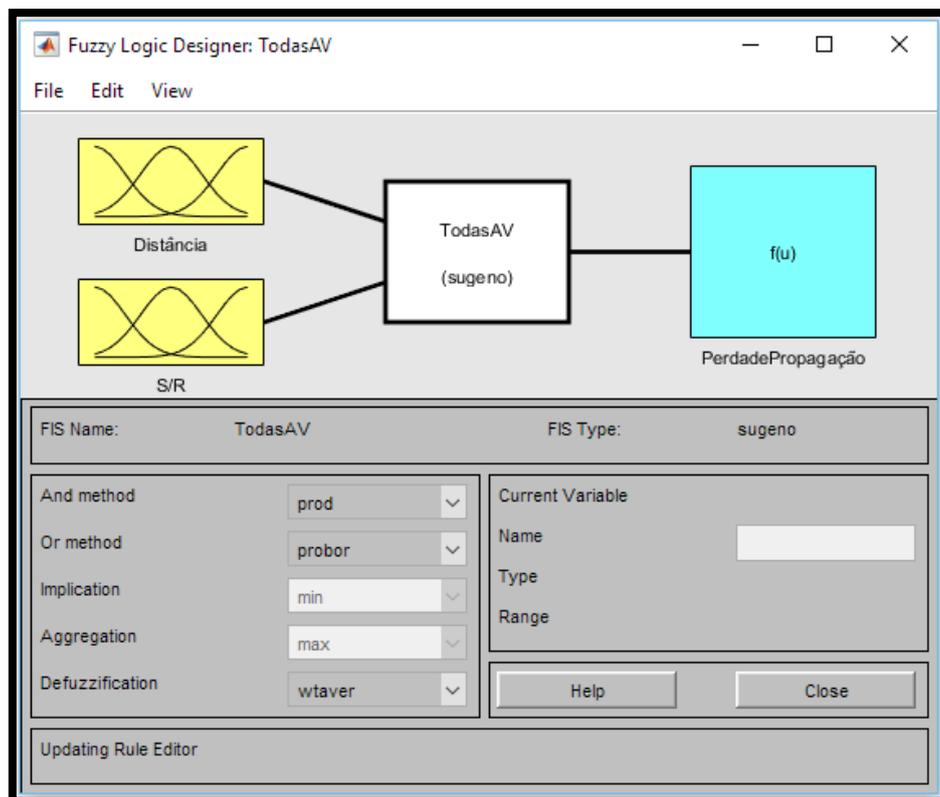


Figura 6.3: Características do Sistema de Inferência

Para a configuração do ANFIS, o método de treinamento escolhido para a rede neural foi o modelo híbrido, devido ao fato de este ter uma melhor precisão para sistema com poucas entradas. Logo em seguida, foram definidos os critérios de parada para o treinamento, que são dois, o erro desejado e o número de épocas (iterações). Outros itens importantes a serem determinados, são a função de pertinência e o tipo de agrupamento, os quais foram definidos, respectivamente, como gaussiana e *subtractive cluster*. Sendo que para o tipo de partição do espaço de entrada via agrupamento (*subtractive cluster*) especificou-se o raio de influência da função gaussiana (valor = 1,0), fator multiplicador (1,5), raio de aceitação no agrupamento (valor = 0,75) e raio de

rejeição no agrupamento (0,25). A Figura 6.4, apresenta a configuração do treino do sistema ANFIS.

Todos os sistemas ANFIS, tinham a mesma configuração, como descrito abaixo:

Características Gerais;

Para treinamento foram utilizados os dados tratados, os quais foram divididos por rotas. Em cada rota foram selecionados aleatoriamente para treinamento 70% dos dados, e 30% para teste. Os conjuntos de pontos tinham um número diferente de amostras, ou seja, uma radial podia ter mais pontos que outra.

As características herdadas da Rede Neural Artificial;

- Sistema de Inferência Fuzzy, gerado baseado em sub. Clustering;
- Método de otimização do treinamento da RNA utilizado foi o Hybrid;

Iterações limitadas a 100 épocas;

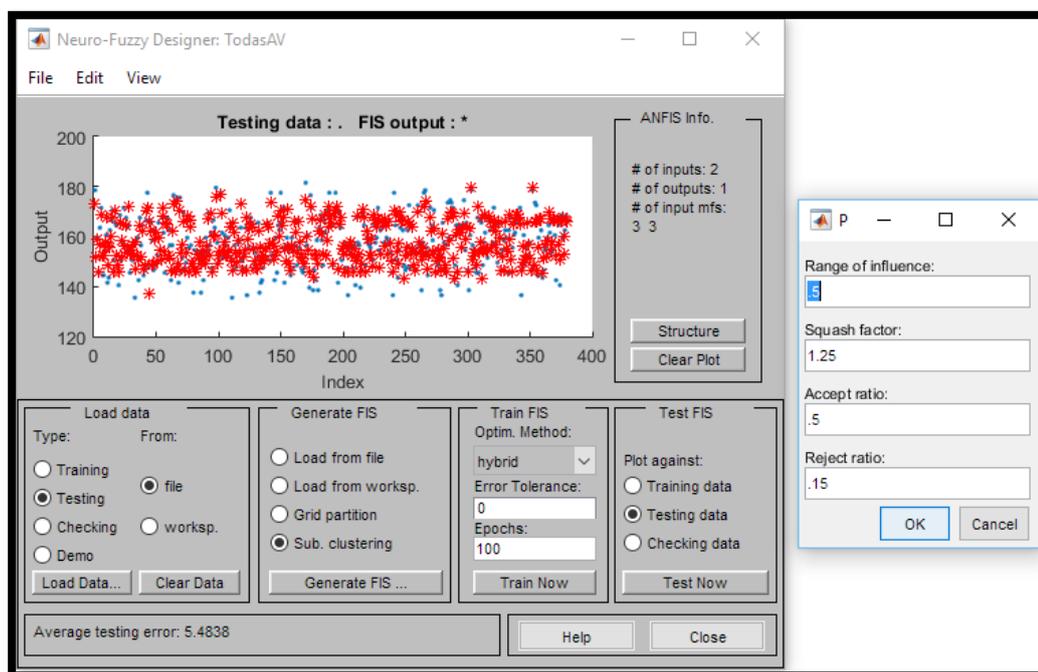


Figura 6.4:Configuração do treinamento do Sistema Neuro-Fuzzy.

As características herdadas das entradas, distância e sinal ruído (S/R) usando a ferramenta computacional implementada neste trabalho foi o sistema de inferência Sugeno, para a função de pertinência utilizou o formato

Gaussiano e a média ponderada para o cálculo da saída. A função de pertinência de cada entrada é demonstrada nas Figuras 6.5 e 6.6 que seguem.

a) Função de Pertinência para a variável Distância.

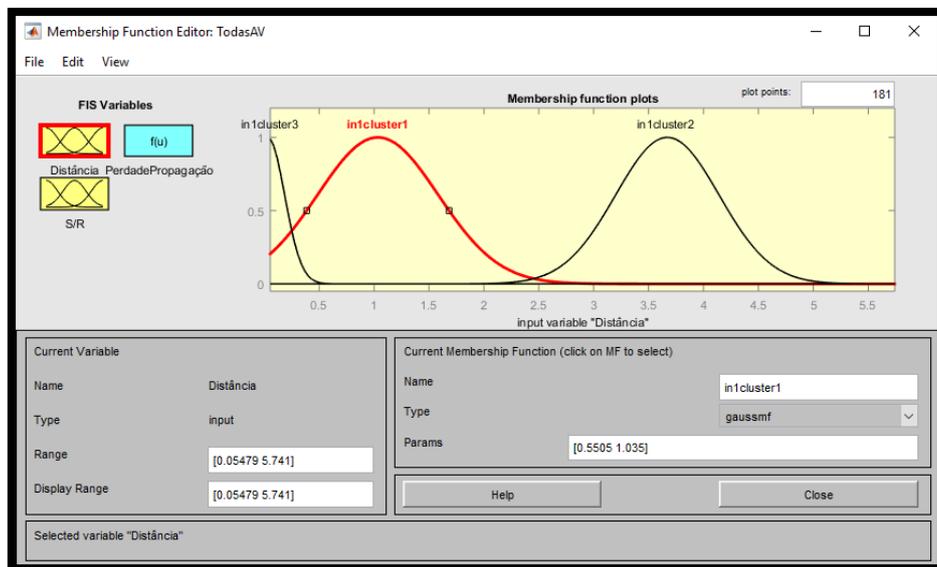


Figura 6.5: Função de Pertinência variável Distância.

b) Função de Pertinência para o variável Sinal Ruído (S/R).

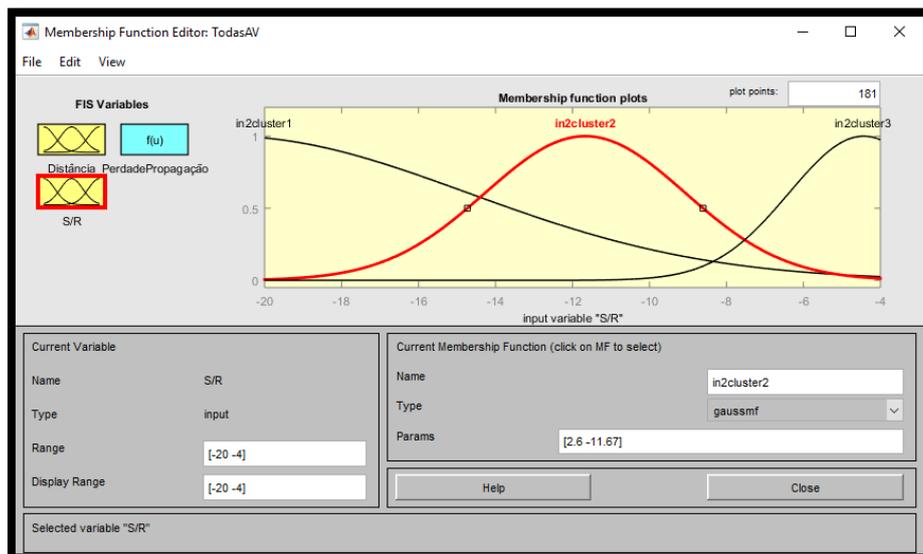


Figura 6.6: Função de Pertinência variável Sinal Ruído.

A partir do aprendizado da rede neural artificial foi gerado um conhecimento em forma de três regras descritas a seguir.

1ª Regra: If (Distância is in1cluster1) and (S/R is in2cluster1) then (PerdadePropagação is out1cluster1).

2ª Regra: If (Distância is in1cluster2) and (S/R is in2cluster2) then (PerdadePropagação is out1cluster2).

3ª Regra: If (Distância is in1cluster3) and (S/R is in2cluster3) then (PerdadePropagação is out1cluster3).

Aplicando as regras, observou-se que para cada valor de distância e relação sinal ruído associados, o sistema é capaz de prever um valor de perda de propagação. A Figura 6.7 apresenta o cenário da aplicação das regras.

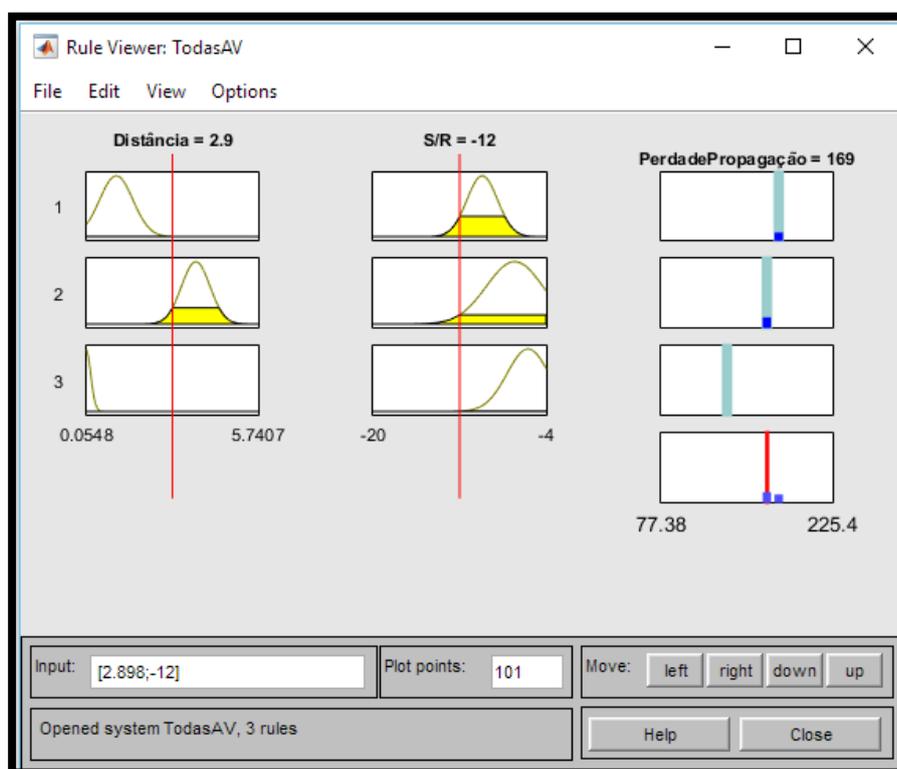


Figura 6.7: Resultado da aplicação das regras.

## 6.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram abordados os cálculos realizados na fase de tratamentos dos dados medidos, bem como, as configurações utilizadas no sistema Neuro-Fuzzy. Com isso, foi possível gerar os resultados que serão mostrados no capítulo seguinte.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos do método de predição de perda de propagação proposto. Para avaliar a capacidade de predição do método e dos modelos de propagação foi utilizado como métrica o erro médio quadrático.

Desta forma, foi possível comparar os valores de perdas de propagação medidas e as previstas por meio da técnica Neuro-Fuzzy, além de comparar com os modelos de propagação empíricos e determinísticos da literatura citados anteriormente. Os resultados são apresentados em diversos formatos no intuito de melhor comentá-los e analisá-los.

### 7.2 Capacidade de Predição e Comparação com os Modelos de Propagação

Tendo como objetivo validar o método de predição exposto no trabalho, foram realizadas comparações entre os valores medidos e os preditos e os modelos de propagação *Cost321-Hata*, ITU-R P.1546-4 e *Walfisch-Ikegami*.

Para isso, foi utilizada a métrica erro médio quadrático (EQM), sendo esta uma forma de avaliar a diferença entre um estimador e o verdadeiro valor da quantidade estimada. O erro médio quadrático mede a média do quadrado do erro, com este cálculo resulta o montante pelo qual o estimador difere da quantidade a ser estimada.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{eo} - Q_{ec})^2}{N}} \quad (7.1)$$

Sendo:

- $N$ = Número de amostra.
- $Q_{eo}$ = Valor Medido.
- $Q_{ec}$ = Valor Predito.

E ainda, com intuito de analisar e verificar a validação do método de predição foram calculados os valores de desvio padrão, as linhas de tendência dos dados medidos e preditos, que são recursos utilizados em problemas que requerem uma análise técnica.

Os gráficos a seguir, relacionam os comportamentos do método de predição gerado pelo ANFIS e dos três modelos de propagação (Cost321-Hata, ITU-R P.1546-4 e Walfisch- Ikegami) com os dados medidos em suas respectivas rotas em relação às perdas de propagação dada em dB com a distância em quilômetro, sendo cada curva caracterizada por uma cor diferente

## 7.2.1 Rota 1.

A rota 1, Figura 7.1 possui o maior conjunto de dados, e observou-se que o método de predição de perda de propagação se mostrou satisfatório a EQM de 5.64 dB, representa a menor taxa em relação aos demais modelos de propagação da literatura testados, além de acompanhar a tendência dos dados medidos.

Os valores perda de propagação para distâncias menores que 1Km ficaram em torno de 152 dB, enquanto os modelos de propagação ficaram bem abaixo desse valor, se mostrando muito otimistas.

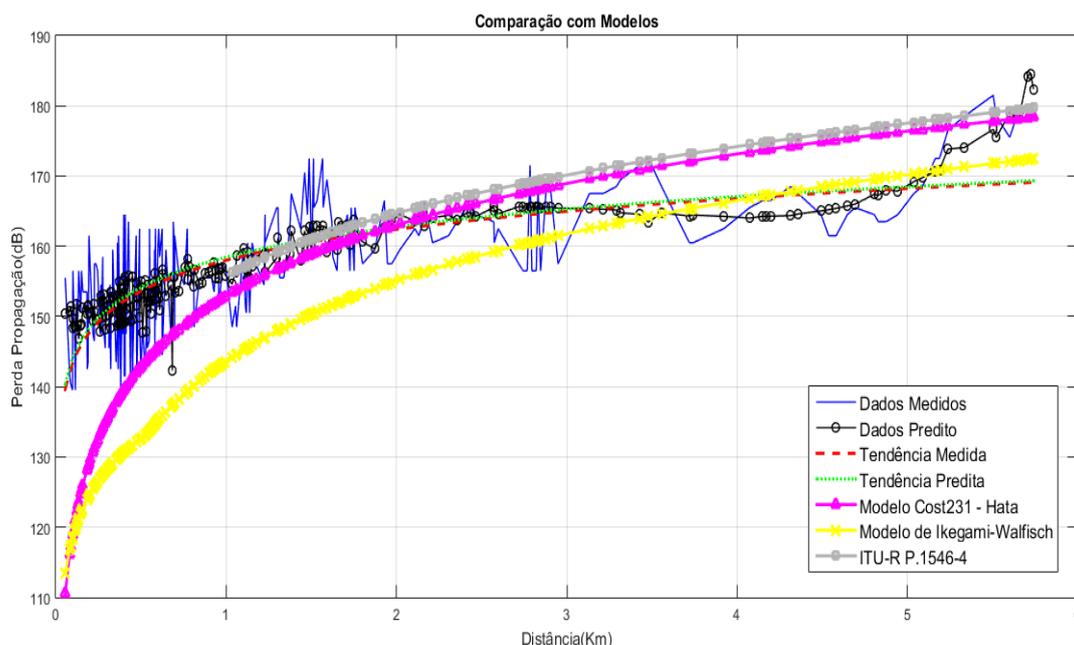


Figura 7.1- Predição de propagação para a Rota 1.

Na tabela 7.1 são mostrados todos os dados comparativos, valores referentes ao erro médio quadrático e o desvio padrão para a rota 1.

Tabela 7.1 - Dados Calculados para as Rotas 1.

MODELOS	MÉTRICAS	
	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB)
PREDITO	5.64	7.45
COST HATA 231	12.20	15.67
ITU-R P.1546-4	7.11	7.23
<i>WALFISCH-IKEGAMI</i>	16.98	15.45

## 7.2.2 Rota 2.

Na rota 2, Figura 7.2, houve uma perda de propagação acentuada nos primeiros metros, pelo o fato de a ERB transmissora do sinal estar situada em uma região central onde se encontram vários prédios. A partir de 0,5 Km os dados se mostram mais próximo do esperado, sendo atenuados pela distância, em relação a rota 1. Nesta rota o sinal se propagou por uma distância maior de 0 a 6 Km, o sinal da rota 2 tendo a mesma potência de transmissão e o mesmo tipo de antena sofreu uma maior atenuação sendo que o sinal se propagou a longo de 2,5Km.

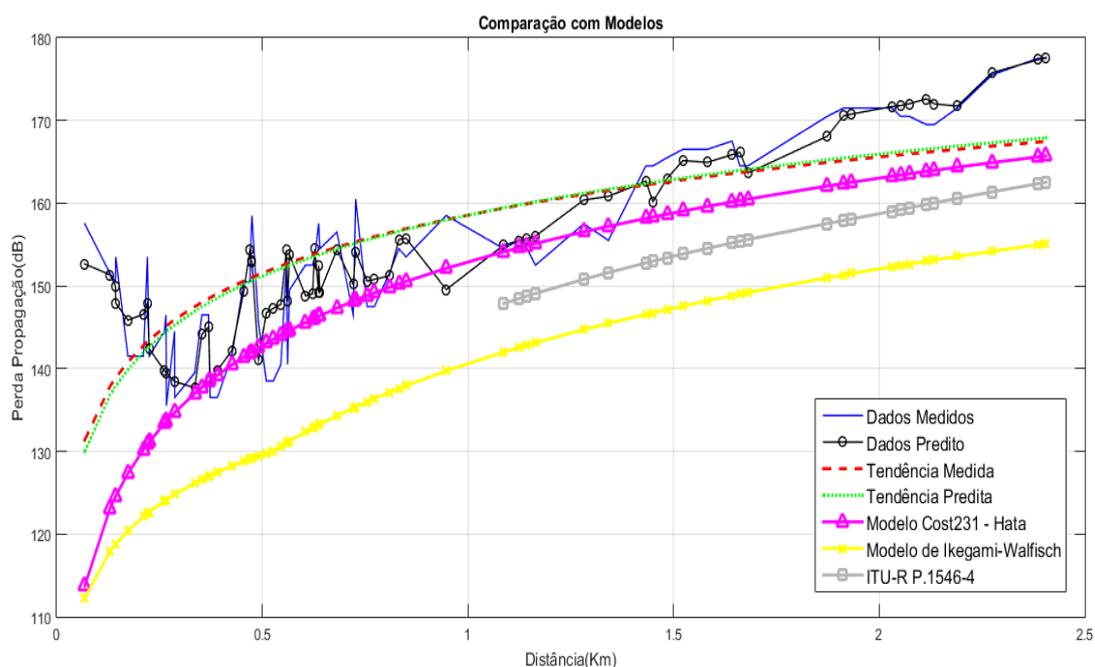


Figura 7.2- Predição de propagação para a Rota 2.

O método de predição de propagação de sinal utilizando a *técnica Neuro-Fuzzy*, apresentado neste trabalho obteve a menor taxa de erro médio quadrático para a rota 2, com resultado 3.88 dB, enquanto o segundo melhor foi o modelo ITUR-P 1546-4 que obteve EQM de 5.62 dB.

A tabela 7.2 mostra os dados comparativos entre o método de predição *Neuro-Fuzzy* e os modelos de propagação.

Tabela 7.2 - Dados Calculados para as Rotas 2.

MODELOS	MÉTRICAS	
	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB)
PREDITO	3.88	10.80
COST HATA 231	10.98	12.21
ITU-R P.1546-4	5.62	3.18
<i>WALFISCH-IKEGAMI</i>	16.92	11.25

### 7.2.3 Rota 3.

Na rota 3, Figura 7.3, o sinal teve um alcance de 4,5 Km, onde o método de predição de perda de propagação *Neuro-Fuzzy*, obteve o menor erro médio quadrático de 2.31 dB devido este ser o menor erro entre todas rotas. O modelo do ITU-R P.1546-4 apresentou o EQM de 4.5 dB.

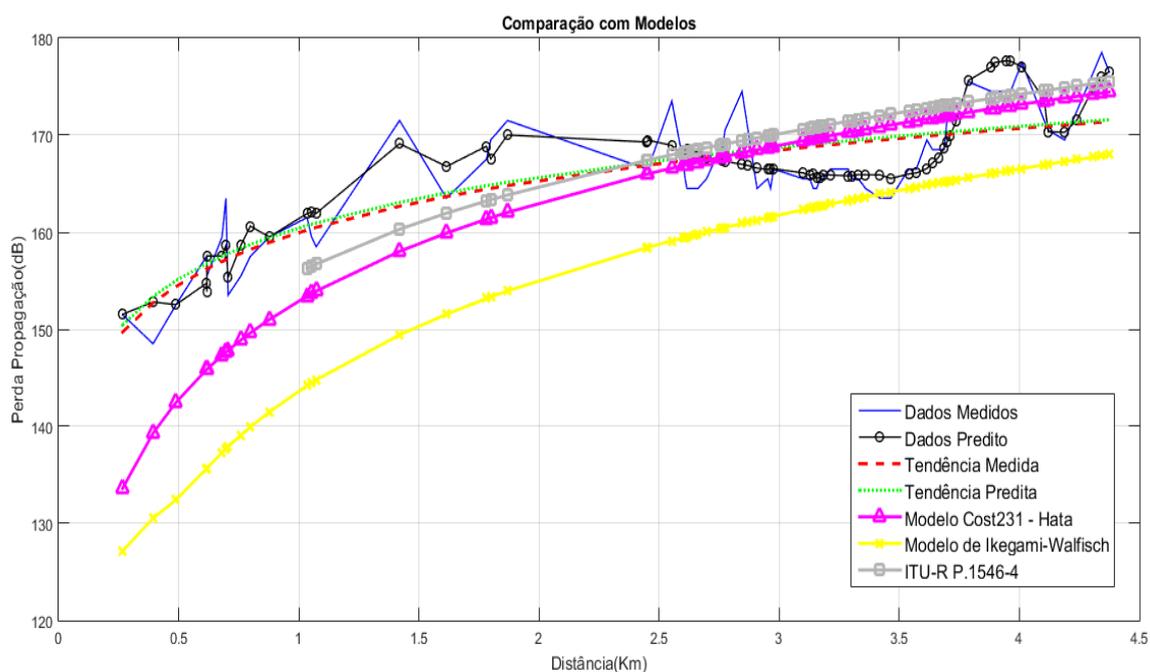


Figura 7.3 - Predição de propagação para a Rota 3.

A tabela 7.3, mostra os dados comparativos entre o método de predição Neuro-Fuzzy e os modelos de propagação.

Tabela 7.3 - Dados Calculados para as Rotas 3.

MODELOS	MÉTRICAS	
	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB )
PREDITO	2.31	6.03
COST HATA 231	6.03	9.98
ITU-R P.1546-4	4.52	4.55
<i>WALFISCH-IKEGAMI</i>	11.22	10.96

### 7.2.4 Rota 4.

A rota 4, Figura 7.4, mostrou uma perda de propagação contínua ao longo da rota, o valor da atenuação da propagação ficou em torno de 150dB, devido aos muitos *handovers* em um curto espaço. Em 2Km ocorreram cinco *handovers*.

Diferentemente das outras rotas, houve ausência de sinal antes de atingir a sensibilidade máxima do equipamento de medição. Enquanto nas outras rotas foram medidas perdas próxima de 180dB, nesta, a ausência de sinal ocorreu quando a perda medida estava aferindo 155dB. É possível ter ocorrido congestionamento no setor no momento no qual o móvel estava recebendo o sinal. Por conta disso, este receptor migrou para uma tecnologia inferior, impossibilitando a continuação da coleta de dados. Neste caso a aferição foi encerrada nesta via.

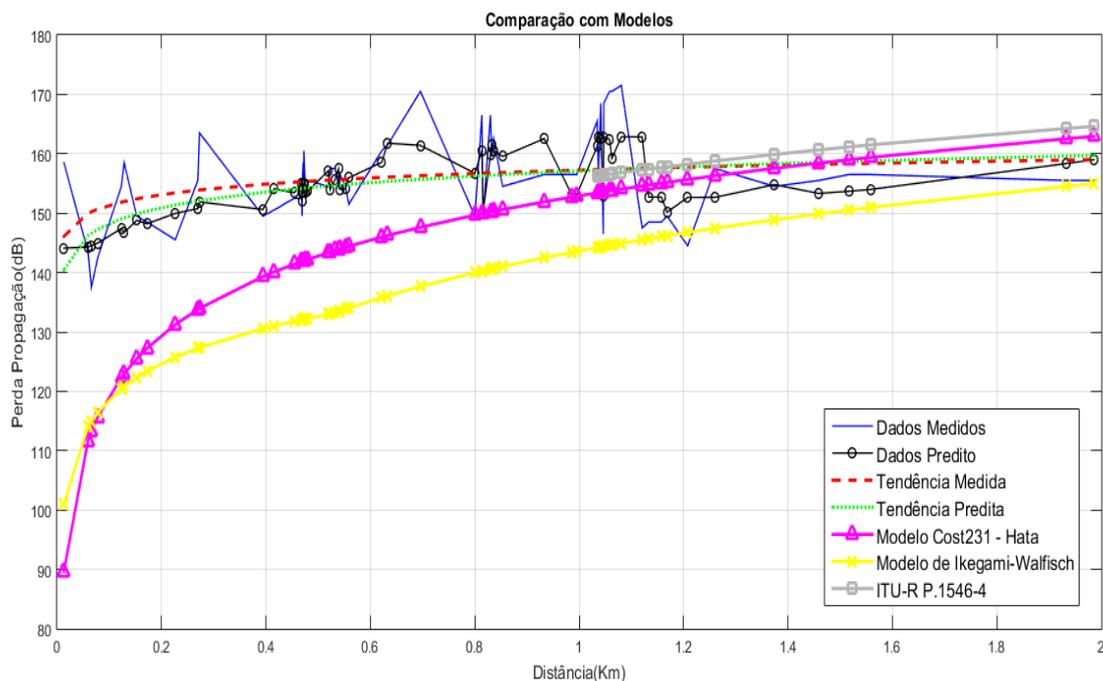


Figura 7.4 - Predição de propagação para a Rota 4.

Na rota 4, o menor EQM apresentado foi do método de predição de perda de propagação Neuro-Fuzzy, este, de 5.58 dB, enquanto o pior caso foi do modelo WALFISCH-IKEGAMI, com uma taxa de EQM de 22.07dB.

A tabela 7.4, mostra os dados comparativos entre o método de predição Neuro-Fuzzy e os modelos de propagação.

Tabela 7.4 - Dados Calculados para as Rotas 4

MODELOS	MÉTRICAS	
	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB)
PREDITO	5.58	5.11
COST HATA 231	17.25	13.59
ITU-R P.1546-4	9.64	2.62
<i>WALFISCH-IKEGAMI</i>	22.07	10.58

## 7.2.5 Generalização dos Dados.

Na Figura 7.5, estão representados todos os pontos referentes a todas as rotas. Esse resultado é o mais relevante do trabalho, porque é o gráfico que representa a generalização das rotas, e leva em consideração diferentes valores de alturas e ganho de antenas. Esta análise caracteriza como se dá a

predição de perda de propagação em uma cidade suburbana com clima equatorial, para uma rede LTE funcionando a 1.800 MHz.

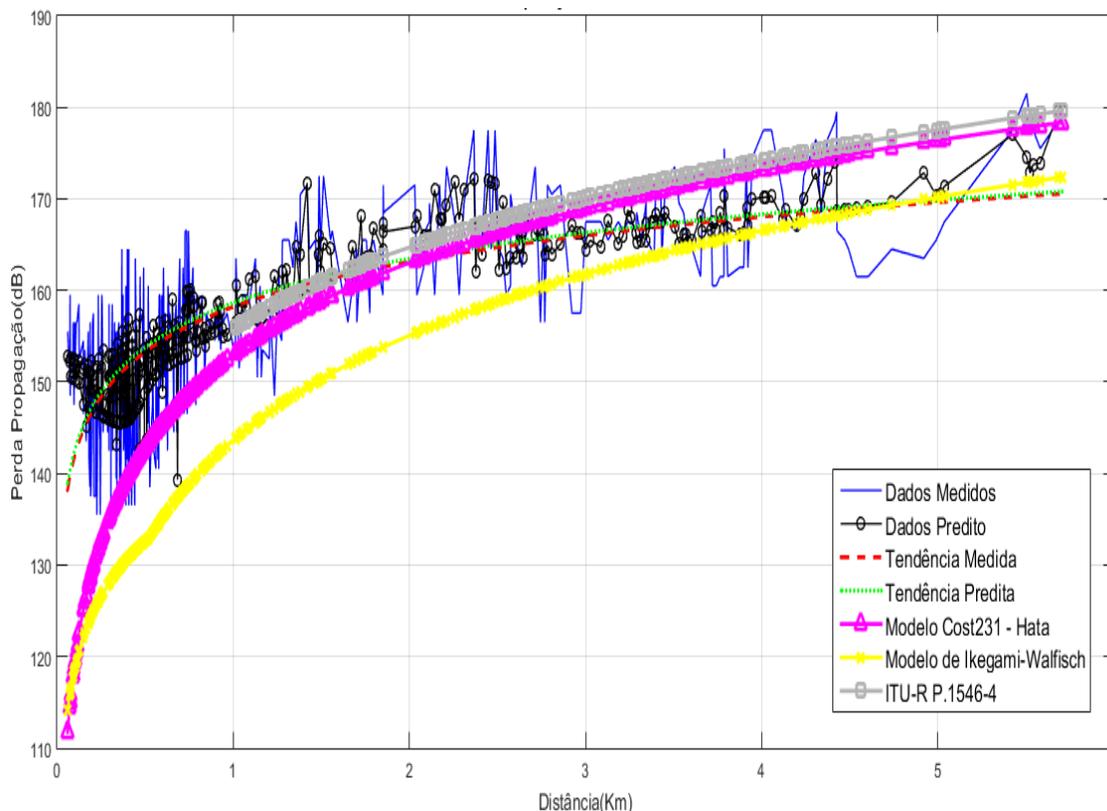


Figura 7.5- Predição de propagação para todas as Rotas.

Logo, o erro médio quadrático geral do método de predição de perda de propagação, utilizando Neuro-Fuzzy, foi de 5.47 dB, já o modelo do ITU-R P.1546-4, a taxa de EQM foi de 6.53 dB, comprovando que o modelo ITU-R P.1546-4, não contempla predições para distancia menores que 1 Km.

A tabela 7.5, mostra os dados comparativos entre o método de predição de perda de propagação, por meio da técnica *Neuro-Fuzzy*, aplicado a todos os dados e modelos de propagação existentes na literatura.

Tabela 7.5 - Dados Calculados para todas as Rotas.

MODELOS	MÉTRICAS	
	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB)
PREDITO	5.47	8.33
COST HATA 231	12.16	15.49
ITU-R P.1546-4	6.53	6.48
WALFISCH-IKEGAMI	17.17	15.22

### 7.3 Considerações Finais

Neste capítulo, descreve-se os resultados obtidos através da utilização da metodologia apresentada no trabalho. Foram calculados os erros médios quadráticos, entre os dados medidos e os valores preditos pelo Sistema *Neuro-Fuzzy*, e entre os dados medidos e os modelos de propagação, a fim de avaliar qual método é o mais preciso.

O método de predição de perda de propagação utilizando *Neuro-Fuzzy* se mostrou satisfatório ao resultar na menor taxa de erro médio quadrático entre os modelos testados (Cost321-Hata, ITU-R P.1546-4 e Walfisch-Ikegami). Logo o método de predição apresentado neste trabalho foi considerado o melhor entre os testados.

## 8 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A metodologia apresentada no trabalho se mostrou satisfatória e promissora. Nesta, os modelos de propagação utilizados na comparação com o método de predição de perda de propagação por meio da técnica *Neuro-Fuzzy*, proposto nesta pesquisa, foi o que obteve a menor taxa de erro.

O método em questão de predição de perda de propagação utilizando a técnica *Neuro-Fuzzy*, é promissor no sentido que mais dados podem ser repassados a ele, com diferentes frequências, característica de cidades, podendo estes serem ampliados se tornando mais gerais.

A análise do modelo proposto teve como base um estudo para comparar os modelos COST231-Hata, Walfisch-Ikegami e ITU-R P. 1546-4. As métricas de desempenho utilizadas foram o erro RMS e o desvio padrão.

O modelo proposto para a rota 1, obteve um erro RMS de 5,64 dB representando a melhor taxa em relação aos demais modelos. O valor da perda de propagação para distância menor que 1Km foi aproximadamente 152 dB, enquanto os modelos ficaram bem abaixo desse valor.

Para a rota 2, o modelo proposto obteve a menor taxa de erro RMS de 3,88 dB em relação aos demais modelos. O segundo melhor resultado foi o modelo ITU-R P. 1546-4, que obteve RMS de 5,62 dB.

Na rota 3, o sinal teve um alcance de 4,5Km, onde o modelo proposto apresentou menor erro RMS de 2,31 dB em relação as demais rotas, enquanto que, os modelos COST231-Hata, Walfisch-Ikegami e ITU-R P. 1546-4, obtiveram erro RMS acima de 4,52 dB.

Para a rota 4, observou uma atenuação contínua no decorrer do percurso. O RMS para o modelo proposto foi de 5,58 dB e a perda de propagação de 150 dB. Esse resultado pode ser que devido à ausência de sinal ocorreram *handovers* em curtos espaços de tempo. Por conta disso o receptor migrou para outra tecnologia inferior impossibilitando continuar a coleta de dados finalizando a rota.

No último gráfico (Figura 7.5), analisa a caracterização para uma cidade suburbana. Representa a generalização de todas as rotas e leva em consideração diferentes valores de alturas e ganho das antenas. O modelo proposto apresentou menor erro RMS de 5,47 dB e desvio padrão de 8,33 dB enquanto o modelo Walfisch-Ikegami foi o que apresentou maior erro RMS com valor de 17,17dB.

O método de predição de perda de propagação, utilizando o *Neuro-Fuzzy* obteve bom desempenho. O segundo melhor resultado foi obtido pelo ITU-R P. 1546-4. Os modelos COST231-Hata, Walfisch-Ikegami não apresentaram resultados satisfatórios para as características atenuantes do ambiente amazônico.

Apesar de uma maior precisão, uma desvantagem desse método em relação aos modelos de propagação é o fato de ele, não ter uma capacidade de generalização, devido este apenas funcionar satisfatoriamente para situações similares aos dados coletados em Castanhal-PA, ou seja, cidades suburbanas que tenham rede LTE na faixa de 1800MHz.

Para trabalhos futuros, pretende-se utilizar os dados obtidos nessa campanha para utilizarmos apenas para treinamento do sistema *Neuro-Fuzzy*. A fim de prever valores de perda de propagação em uma situação similar abordada neste trabalho. E assim comparar os dados preditos com os dados medidos nesta situação similar.

Também, objetiva-se coletar mais dados a fim de treinar o sistema *Neuro-Fuzzy*, em diferentes frequências, ou até mesmo fazer uma abordagem com um parâmetro de entrada no sistema, como por exemplo, grau de obstrução entre transmissor e receptor, dessa forma aumentar a precisão das predições.

## REFERÊNCIAS

- [1] RAMALHO, G. “Uma Ferramenta de Predição e Avaliação de Cobertura para Sistemas de Comunicação Ponto-Área”. 2006. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, Santa Rita do Sapucaí. 2006.
- [2] GARCIA, A. “Implementação Eletrônica de Sistemas Fuzzy”. 2009. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica)–Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.
- [3] LYRA, B. “Modelo de Propagação para Redes sem Fio Fixas na Banda de 5,8 GHz em Cidades Típicas da Região Amazônica”. 2009. 21f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2009.
- [4] L.W. Li, C. K. Lee, T. S. Yeo and M. S. Leong, “Wave Mode and Path Characteristics in a Four-Layered Anisotropic Forest Environment”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 9, September 2004.
- [5] ANATEL. Disponível em:  
<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=39011>. Acessado em 04 de abril de 2016.
- [6] PINHEIRO, M. “Planejamento de Rede LTE utilizando aproximação híbrida de modelo empírico outdoor: medição e técnica de Algoritmo Genético”. 2015. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Elétrica)–Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2015.
- [7] MELLO, B. “Modelo de Propagação para Ambiente de Parque Urbano”. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Telecomunicações)–Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2012.

[8] FERREIRA, G., BITTENCOURT, E., CANAVITSAS, A., COSTA, E., SILVA J., MATOS, L. “Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Predição de Cobertura de Sinal Rádio VHF em Terreno Acidentado”. XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasília, 2012.

[9] GONZÁLES, R. “Análise de Atenuação de Sinal em Ambientes Indoor Usando Lógica Nebulosa”. 2009. 143f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações)–Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas. 2009.

[10] RAPPAPORT, T. S. “Wireless Communications Principles and Practice”. USA, Prentice Hall, 2002.

[11] COSTA, J. “Uma Metodologia para Predição do Campo Elétrico de Radiodifusão Sonora em Ondas Médias Utilizando Redes Bayesianas”. 2013. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2013.

[12] SAUNDERS, S.R. “Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems”. Baffins Lane: John Wiley and Sons, 1999.

[13] OKUMURA, T.; OHMORI, E.; FUKUDA, K. “Field strength and its variability in VHF and UHF Land-Mobile radio servisse”. Review of the Electrical Communication Laboratory, v. 16, 9-10, p.825-873, 1968.

[14] EUROPEAN COOPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH EURO-COST231, “Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800MHz Bands”. Revision 2, The Hagne, set. 1991.

- [15] ITU. International Telecommunication Union, Method for point-to-area for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz,” ITU Recommendation, Outubro 2009.
- [16] NASCIMENTO, R.; GOMES, C.; MARTINS, B.; ALMEIDA, M.; GOMES, H.; CAVALCANTE, G. "Ajuste na Recomendação ITU-R P.1546-4 para Predição de Campo Elétrico de TV Digital na Região Metropolitana de Belém". In: MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE-MOMAG, João Pessoa 2012.
- [17] IKEGAMI, F. TAKEUCHI, T. YOSHIDA, S. "Theoretical prediction of mean field strength for Urban Mobile Radio", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.39, No.3, 1991.
- [18] WANG, LX. A Course In Fuzzy Systems and Control - Prentice-Hall International, USA, 1997.
- [19] TANSCHKEIT, R., Sistemas Fuzzy. Disponível em: <http://www.dainf.cefetpr.br/~myriam/PastaWeb/Fuzzy/ApostilaFuzzy.pdf>. Acessado em 11 de fevereiro de 2016.
- [20] ZADEH, L. "Fuzzy sets. Information and control", New York, v. 8, n. 3, p. 338-353, Jun. 1965.
- [21] LIMA, H. "Sistemas Inteligentes para Auxiliar na Tomada de Decisões em Mercado de Capitais" 2012. 193f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas)–Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2012.
- [22] AGUADO A.; CANTANHEDE M. "Lógica Fuzzy". Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2010.
- [23] REZENDE, S. Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações. Editora Manole Ltda – 1ª edição 2005.

[24] LEITE, J.; BASSANEZI R. Descrição de processos difusivos utilizando apenas base de regras. 2011. In: BIOMATEMÁTICA IMECC - UNICAMP, Campinas.2011.

[25] SHAW, I. S.; SIMÕES, M.G., Controle e Modelagem Fuzzy. Editora Edgard Blücher Ltda – 1ª edição 1999.

[26] CANTOR, G., Über eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen, Crelles Journal f. Mathematik, 77 (1874) 258–262.

[27] ARTERO, O. A., Inteligência Artificial Teórica e Prática. Editora Livraria da Física – 1ª edição 2009.

[28] MORAES, C. FUZZYCOM-Componente de Lógica Fuzzy.Disponível em:

[http://www.pucrio.br/Pibic/relatorio\\_resumo2007/relatorios/ele/ele\\_claudio\\_magno\\_martinsmoraes](http://www.pucrio.br/Pibic/relatorio_resumo2007/relatorios/ele/ele_claudio_magno_martinsmoraes).acessado em 16 de fevereiro de 2016.

[29] MATHWORKS -Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide. Disponível em: [http://cn.mathworks.com/help/pdf\\_doc/fuzzy/fuzzy.pdf](http://cn.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf). Acessado em 18 fevereiro de 2016.

[30] RIBACIONKA, F. Sistemas Computacionais Baseados em Lógica Fuzzy. 1999. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica Área de Concentração: Engenharia da Computação, Universidade Mackenzie, São Paulo. 1999.

[31] PAGLIOSA, A. Obtenção das Funções de Pertinência de um Sistema Neurofuzzy Modificado pela Rede de Kohonen. 2006. 130f. Dissertação (Mestrado em Automação Industrial) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joiville. 2003.

- [32] EVSUKOFF, A. G.; ALMEIDA P. E. M., 2003, “Sistemas Fuzzy”, In: Rezende, S.O. (coord), “Sistemas Inteligentes-Fundamentos e Aplicações”, 1ª Edição, capítulo 7, São Paulo, Brasil, Ed Manole.
- [33] TAKAGI, T. SUGENO, M. (1985). “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control”. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 15(1):116–132.
- [34] MOZELLI, L. “Controle Fuzzy para Sistemas Takagi-Sugeno: Condições Aprimoradas e Aplicações”. 2008. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2008.
- [35] MOUTINHO, M. “Resultados Experimentais em Identificação Paramétrica, Controle Digital e Fuzzy de um Gerador Síncrono”. 2006. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Federal do Para, Belém. 2006.
- [36] S. Haykin, Neural networks and learning machines, Prentice-Hall, 2009.
- [37] FERREIRA, L. “Um trading system autônomo baseado em redes neurais artificiais”. 2009. 69f. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- [38] FAUSETT, L. Fundamentals of Neural Networks: architectures, algorithms and applications. Florida Institute of Technology: Prentice Hall, 1994. p. 436. ISBN: 0- 13-334186-0.
- [39] TAFNER, M. XEREZ, M. RODRIGUES, I. “Redes Neurais Artificiais: Introdução e Princípios de Neurocomputação”. EKO. 1996.

[40] CARVALHO, A. LUDEMIR, A. “Fundamentos de Redes Neurais Artificiais”: 11ª Escola de Computação. Imprinta Gráfica e Editora Ltda, 1998.

[41] PINTRO, F. Análise Morfológica dos Eritrócitos nas Doenças Hematológicas através da Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Processamento de Imagens Digitais. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Departamento de Física, Estatística e Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

[42] TONSIG, S. Redes Neurais Artificiais Multicamadas e o Algoritmo Backpropagation. Notas de Aulas, Campinas, 2000.

[43] YAMAMOTO, Y. NIKIFORUK, P. “A New Supervised Learning Algorithm for Multilayered and Interconnected Neural Networks”. IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 11, n.1, 2000.

[44] FINOCCHIO, M. “Noções de Redes Neurais Artificiais”. Notas de Aulas, Laboratório de Segurança e Iluminação e Eficiência Energética Universidade Federal do Paraná, 2014.

[45] DBD, Disponível em: [http://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721406\\_09\\_cap\\_04.pdf](http://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721406_09_cap_04.pdf). Acessado em 26 de fevereiro de 2016.

[46] JANG. R. ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems. IEEE Trans.on Systems, Man, and Cybernetics, 23 (03):665-685, May, 1993.

[47] CHAVES, L. “Modelos Computacionais Fuzzy e Neuro-Fuzzy para Avaliarem os Efeitos da Poluição do Ar”. 2013. 113f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2013.

[48] CRUZ, H. “Análise de Métricas de QoS para Predição de QoE utilizando a Técnica Neuro-Fuzzy em Transmissão de Vídeo em Redes Wi-Fi”. 2016. 61f. Monografia (Graduação em Bacharel em Engenharia da Computação), Faculdade de Engenharia da Computação e Telecomunicações, Universidade Federal do Pará, Belém. 2016.

[49] MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial. Proceedings of IEEE, v.83, n. 3, p. 345-377, Mar. 1995.

[50] MATLAB, Disponível em <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Acessado em 18 de fevereiro de 2016.

[51] 3GPP, Disponível em:

<http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>. Acessado em 21 de fevereiro de 2016.

[52] SESIA, S.TOUFIK, I. BAKER, M., LTE.The.UMTS.Long.Term.Evolution.From. Theory.to.Practice. John Wiley & Sons Ltd. – 2nd.Edition 2011.

[53] CARVALHO, M. Planejamento e Optimização em Redes Celulares Móveis Auto-Geridas Assentes em LTE. 2011. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electronica e Telecomunicações), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. 2011

[54] 3GPP TS 36.300 V10.1.0 Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10) Disponível em: <http://www.3gpp.org/Specs/36300-a10.pdf>. Acessado em 21 de fevereiro de 2016.

[55] MAZZONI, V. Análise Histórica e Funcional das Redes 4G LTE. 2014. 59f. Monografia (Graduação em Bacharelado em Sistemas de

Informação), Instituto de Ciências Exatas Departamento de Ciências da Computação. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2014.

[56] HOLMA H., TOSKALA A. WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE. New Delhi: John Wiley & Sons, 4th ed., 2007.

[57] KITAGAWA, F., COSTA I, RAMOS P. Simulação da Interface Aérea do Sistema Móvel LTE e Análise de Métricas QoS para Tráfego Multimídia. 2011. 59f. Monografia (Graduação em Bacharel em Ciência da Computação), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da UNAMA. Universidade da Amazônia, Belém. 2011.

[58] CORNELIO, J. Inovações Tecnológicas no Setor de Telecomunicações no Brasil: Desafios e Oportunidades do LTE para expansão da Telefonia Móvel. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado Internacional de Gerenciamento da Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresa) Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro. 2011.

[59] PEREIRA, L. JUNIOR, N. Estudo da Implementação de Redes Long Term Evolution em Florianópolis. 2013. 176f. Monografia (Graduação em Engenheiro Eletricista). Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça. 2013.

[60] SILVA, K. Análise de Handover a partir do uso de Femtocells em Redes LTE: Abordagem Baseada em Simulação Discreta. 2014. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2014.

[61] Mobile Broadband Evolution the roadmap from HSPA to LTE.

Disponível em:

[file:///C:/Users/hp%20i3/Downloads/UMTS\\_Forum\\_MBB\\_LTE\\_White\\_Paper\\_February\\_2009\\_v2.pdf](file:///C:/Users/hp%20i3/Downloads/UMTS_Forum_MBB_LTE_White_Paper_February_2009_v2.pdf). 2009. Acessado em 05 de março de 2016.

[62] NIKOLOFSK, D. “A Quarta Geração das Redes sem Fio: Benefícios e Evolução”. 2011. 28f. Monografia (Especialista em Teleinformática e

Redes de Computadores), DAELN. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2011.

[63] APT/AWG/REP-53. Migration Strategy of Gsm to Mobile Broadband. 2014. 17th Meeting of APT Wireless Group, Macao, China. 2014.

[64] NOKIA, Siemens Networks LTE 1800 MHz. Introducing LTE with maximum reuse of GSM assets. 2011. Disponível em: <http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03/lte1800mhzwhitepaper0.9.pdf>. Acessado em 05 de março de 2016.

[65] IBGE – PARÁ CASTANHAL (CIDADES). Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=150240&search=para|castanhal|infograficos:-informacoes-completas>. Acessado em 06 de março de 2016.

[66] PREFEITURA DE CASTANHAL. Disponível em: <http://www.castanhal.pa.gov.br/sobrecastanhal.php>. Acessado em 06 de março de 2016.

[67] G-NetTrack. Disponível em: <http://www.gyokovsolutions.com/GNetTrack%20Android.htm> . Acessado em 15 de janeiro de 2016.

[68] GOOGLE EARTH. Disponível em: <http://www.google.com/intl/pt-PT/earth/>. Acessado em 07 de março de 2016.

[69] PASTERNAK. Disponível em: <https://www.pasternack.com/t-calculator-link-budget.aspx>. Acessado em 07 de março de 2016.

[70] STAFF. Disponível em: <http://staff.on.br/jlkm/geopath/>. Acessado em 07 de março de 2016.