

José Henrique Silva de Oliveira

**Avaliação da Cobertura do Sinal de TV Digital
na Cidade de João Pessoa Utilizando
Redes Neurais Artificiais**

João Pessoa

06 de Março de 2015

José Henrique Silva de Oliveira

**Avaliação da Cobertura do Sinal de TV Digital
na Cidade de João Pessoa Utilizando
Redes Neurais Artificiais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal da Paraíba como exi-
gência para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Juan Moises Maurício Villanueva
Coorientador: Fabrício Braga Soares de Carvalho

João Pessoa
06 de Março de 2015

Dedico este trabalho à minha família, principalmente meus pais, Josefa e Etevaldo, e meu irmão, Neto, pelo incentivo e por nunca cessarem de acreditar em mim.

Agradecimentos

Agradeço

- a Deus, por poder glorificá-lo em meu curso;
- aos Professores Juan e Fabrício (por não ter desistido no primeiro artigo) pela orientação, dedicação e incentivo;
- à Pamela, por sempre estar ao meu lado;
- aos integrantes do PROEXT, pela ajuda nas medições;
- a todos os meus amigos do curso de Engenharia Elétrica da UFPB, que sofreram comigo;
- a todos os professores da UFPB, em especial aos do Departamento de Engenharia Elétrica;
- e a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui.

Resumo

O estudo da cobertura e estimação do sinal de TV Digital tem uma grande importância, principalmente no Brasil, onde a TV Digital está em processo de implantação, para que o serviço possa ser melhorado. Neste trabalho, a estimação e avaliação foram feitas aplicando modelos de propagação em radiofrequência e algoritmos de Redes Neurais Artificiais (RNA), juntamente com medições de intensidade de sinal em campo. Após as medições conduzidas para a cidade de João Pessoa, com uma ênfase maior no bairro dos Bancários, os modelos foram comparados com os valores medidos e a rede neural foi treinada com essas medidas. A aplicação dos modelos levou à conclusão de que os modelos de propagação log-distância e Okumura-Hata podem ser usados para a estimação da intensidade do sinal de TV. O treinamento e teste da rede neural também foi satisfatório, para o modelo de Okumura-Hata, como um teste inicial, e para o bairro dos Bancários.

Palavras-chave: TV Digital. Modelos de Propagação. Redes Neurais Artificiais.

Abstract

The study of coverage and estimation of Digital Television signal has a great significance, principally in Brazil, where Digital Television is in process of implantation, for the improvement of service. In this work, estimation and evaluation were made by using radio frequency propagation models and Artificial Neural Networks (ANN) algorithms, along with signal strength field measurements. After leading the measurements to the city of João Pessoa, with emphasis in the district of Bancários, the models were compared with the measured values and the neural network trained with these measurements. Application of the models led to the conclusion that the log-distance and Okumura-Hata propagation models can be used to estimate the TV signal strength. The training and test of the neural network was satisfactory, for the Okumura-Hata model, as an initial test, and to the district of Bancários.

Keywords: Digital Television. Propagation Models. Artificial Neural Networks.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Conjunto de padrões em um sistema de TV Digital.	14
Figura 2 – Diferenças entre as razões de aspecto de vídeo.	15
Figura 3 – Varredura entrelaçada e progressiva.	15
Figura 4 – Difusão e interatividade em um sistema de TV Digital.	17
Figura 5 – TV Digital no mundo (Maio de 2014).	18
Figura 6 – Alocação de programas e segmentos no ISDB-Tb.	21
Figura 7 – Onda eletromagnética (v é a velocidade de propagação da onda).	22
Figura 8 – Espectro eletromagnético.	23
Figura 9 – Exemplo de diagrama de radiação de uma antena.	24
Figura 10 – Refração e difração em uma transmissão de ondas eletromagnéticas.	26
Figura 11 – a. Dispersão em uma partícula. b. Comunicação por dispersão troposférica.	26
Figura 12 – Perdas em função da distância (Modelo de propagação em espaço livre).	29
Figura 13 – Perdas em função da distância (Modelo de propagação log-distância).	31
Figura 14 – Perdas em função da distância (Modelo de propagação Okumura-Hata).	32
Figura 15 – Modelo de um neurônio artificial não-linear.	35
Figura 16 – Modelo modificado de um neurônio artificial não-linear.	35
Figura 17 – a. Degrau unitário. b. Função sinal. c. Função sigmoide com a variando. d. Função tan-sigmoide (tangente hiperbólica).	37
Figura 18 – Rede sem realimentação com uma única camada de neurônios.	38
Figura 19 – Rede sem realimentação com duas camadas de neurônios (uma camada oculta e outra de saída).	39
Figura 20 – Rede recorrente com 4 laços de realimentação sem neurônios escondidos.	39
Figura 21 – Diagrama de blocos do processo de aprendizado supervisionado.	40
Figura 22 – Mapa de João Pessoa e proximidades (Altitude).	42
Figura 23 – Analisador de espectro portátil N9340B.	43
Figura 24 – Espectro com frequência central de 500 kHz e largura de banda de 67 MHz.	43
Figura 25 – Antena VHF/UHF log-periódica.	44
Figura 26 – Diagrama de radiação da antena.	45
Figura 27 – GPS Garmin eTrex 10.	45
Figura 28 – Mapa de João Pessoa com as rotas tomadas.	46
Figura 29 – Interface gráfica do programa de conexão com o analisador, desenvolvida no TCC.	47
Figura 30 – Antena acoplada ao veículo utilizado (2,1 m de altura).	48
Figura 31 – Modelo utilizado de RNA.	49
Figura 32 – Resultado das medições para João Pessoa (P em dBm).	51

Figura 33 – Resultado das medições para João Pessoa (adicionando-se um ganho de 5 dB, e com P em dBm).	52
Figura 34 – Resultado da aplicação do modelo de espaço livre para João Pessoa. . .	53
Figura 35 – Resultado da aplicação do modelo log-distância para João Pessoa. . .	54
Figura 36 – Resultado da aplicação do modelo de Okumura-Hata para João Pessoa.	55
Figura 37 – Resultado da aplicação do modelo de Okumura-Hata (modificado) para João Pessoa.	56
Figura 38 – Valores de potência de 100 pontos para a rede neural treinada com o modelo de Okumura-Hata (modificado).	57
Figura 39 – Valores de potência de 100 pontos para a rede neural treinada com as medições pela cidade.	57
Figura 40 – Comparação entre os modelos de propagação e os valores das medições em função da distância do transmissor.	58
Figura 41 – Comparação entre os modelos de propagação e os valores das medições em função da distância do transmissor (Bancários).	59

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações para transmissão terrestre.	18
Tabela 2 – Valores de n para diferentes ambientes.	30
Tabela 3 – Parâmetros de alguns pontos medidos.	50
Tabela 4 – Erros para cada um dos treinamentos.	56
Tabela 5 – Comparação entre os valores medidos e os valores fornecidos pela rede neural.	58

Lista de abreviaturas e siglas

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
API	Interface de Programação de Aplicativos
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
BML	<i>Broadcast Markup Language</i>
BST-OFDM	<i>Band-Segmented Transmission OFDM</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
DASE	<i>DTV Application software Environment</i>
DTED	<i>Digital Terrain Elevation Data</i>
DTBM	<i>Digital Terrestrial Multimedia Broadcast</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting Terrestrial</i>
EBU	União Européia de Radiodifusão
EPG	<i>Electronic Programming Guide</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GPX	<i>GPS eXchange Format</i>
HDTV	Televisão em Alta Definição
HTML	<i>Hyper Text Markup Language</i>
IMP	<i>Interactive Media Platform</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial</i>
ISDB-Tb	<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Brazilian Version</i>
ITU	União Internacional de Telecomunicações
LDTV	Televisão em Baixa Definição
MHP	<i>Multimedia Home Platform</i>

MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
QAM	Modulação de Amplitude em Quadratura
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
SDTV	Televisão em Definição Padrão
SMS	<i>Short Message Service</i>
UHDTV	<i>Ultra HDTV</i>
USGS	<i>United States Geographic Survey</i>
VISA	<i>Virtual Instrument Software Architecture</i>
VSF	Banda Lateral Vestigial
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Sumário

	Introdução	13
1	TELEVISÃO DIGITAL	14
1.1	Definição e Características	14
1.1.1	<i>Middleware</i> e Interatividade	16
1.2	Padrões de TV Digital	17
1.2.1	ATSC	18
1.2.2	DVB-T	19
1.2.3	ISDB-T	19
1.2.4	DTMB	20
1.2.5	ISDB-Tb	20
2	MODELOS DE PROPAGAÇÃO EM RADIOFREQUÊNCIA	22
2.1	Radiação Eletromagnética	22
2.2	Antenas	23
2.3	Mecanismos de Propagação	25
2.3.1	Reflexão	25
2.3.2	Difração	25
2.3.3	Dispersão	25
2.3.4	Perdas na propagação	26
2.4	Modelo de Propagação em Espaço Livre	28
2.5	Modelo de Propagação Log-distância	30
2.6	Modelo de Okumura-Hata	30
3	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	33
3.1	Definição	33
3.1.1	Características	33
3.2	O Neurônio Artificial	34
3.2.1	Funções de ativação	36
3.3	Arquiteturas de Redes Neurais	37
3.3.1	Redes sem realimentação	37
3.3.1.1	Camada única	37
3.3.1.2	Múltiplas camadas	38
3.3.2	Redes recorrentes ou realimentadas	38
3.4	Processos de Aprendizado	39

4	CAMPANHA DE MEDIÇÕES E DESENVOLVIMENTO DO MO- DELO DE COBERTURA UTILIZANDO RNA	41
4.1	Sistemas de Coordenadas Geográficas	41
4.2	Sistema de Transmissão	42
4.3	Sistema de Medição	42
4.3.1	Analisador de espectro	43
4.3.2	Antena de VHF/UHF externa	44
4.3.3	GPS	44
4.4	Metodologia das Medições	46
4.5	Modelos de Propagação e Modelo de RNA Utilizados	48
5	RESULTADOS	50
5.1	Resultados das Medições de Campo	50
5.2	Modelo de Propagação em Espaço Livre	53
5.3	Modelo de Propagação Log-Distância	53
5.4	Modelo de Okumura-Hata	54
5.5	Modelo Proposto de RNA	55
5.6	Comparação e Validação dos Resultados	58
	Conclusão	60
	Referências	62
	ANEXOS	64
	ANEXO A – PROGRAMA DE LEITURA DE DADOS DTED E APLICAÇÃO DOS MODELOS	65
	ANEXO B – PROGRAMA DE CRIAÇÃO E TESTE DA REDE NEU- RAL (PADRÃO)	67
	ANEXO C – FUNÇÕES DE CONEXÃO E MEDIÇÃO DA INTER- FACE GRÁFICA	68

Introdução

Os estudos para o desenvolvimento de um tipo de TV com qualidade superior à TV Analógica data dos anos 90, no Japão (BENTON, 2015). Porém, a primeira transmissão oficial de sinal de TV Digital (TVD) no Brasil foi realizada em dezembro de 2007. Após esse marco, foi decidido que o padrão de TV que o Brasil adotaria seria um baseado no padrão japonês, com algumas modificações em relação ao padrão original, e seria chamado de ISDB-Tb (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Brazilian Version*). Atualmente, a TVD vem se desenvolvendo cada vez mais no Brasil; como ela está em processo de implantação, principalmente em estados menos desenvolvidos, há a necessidade de verificar a qualidade da transmissão e recepção do sinal de TV Digital. A estimação da cobertura desse sinal é uma aplicação de grande importância tanto para emissoras de televisão como para estabelecimentos e usuários que usufruem dessa tecnologia.

Para se estimar a potência do sinal de TV Digital, e por sua vez a cobertura da transmissão, existem modelos de propagação teóricos, geralmente usados para a propagação de sinais de telefonia celular (SWAMY; DU, 2010). Esses modelos também são apropriados para estimar a atenuação em uma transmissão de TV Digital. Foram escolhidos três modelos para serem estudados: o modelo de propagação em espaço livre, o modelo de propagação log-distância e o modelo de Okumura-Hata. Estes modelos foram escolhidos devido à facilidade de implementação, e dos parâmetros que influenciam nela. Estudos sobre antenas também foram feitos para se apresentar soluções para o melhoramento da recepção do sinal de TV Digital.

A identificação da situação da cobertura da TV Digital em João Pessoa (para uma emissora específica), foi realizada estipulando-se rotas em que seriam conduzidas as medições em pontos estratégicos da cidade. Para que os parâmetros necessários fossem determinados, foram utilizados um analisador de espectro portátil, um dispositivo de GPS, uma antena de UHF externa. Esses pontos foram utilizados para serem comparados com os valores fornecidos pelos modelos, e para desenvolver um modelo de propagação baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA). A RNA foi escolhida para estimar a potência nos pontos da cidade devido à sua não-linearidade e sua característica de reconhecer padrões. Foram estudados várias formas de treinamento, nas mais diversas configurações, para se obter um resultado otimizado para a estimação. Também foram aplicadas normas para que o nível de sinal fosse avaliado corretamente, dentro dos níveis estabelecidos por elas.

1 Televisão Digital

Este capítulo aborda a definição e as características da TV Digital, como definição de imagem e *middleware*, além de comparar os padrões de TV utilizados no mundo.

1.1 Definição e Características

Antigamente as fases da produção de um programa de TV (como a gravação de cenas, edição, armazenamento), a transmissão (modulação, amplificação, transmissão por ondas de rádio) e a recepção (captura do sinal pela antena, demodulação no receptor da TV e apresentação do som e imagem) eram todas analógicas; os sinais de áudio e vídeo nos estúdios, bem como os transmitidos, eram analógicos, em torno de uma década atrás. Hoje em dia essas informações são geradas digitalmente, e podem ser tanto convertidas e transmitidas como sinais analógicos para televisores com receptores analógicos quanto serem transmitidas como sinais digitais; a imagem, som e todas as informações adicionais são geradas, transmitidas e recebidas digitalmente. Entretanto, vale ressaltar que a transmissão não é 100% digital, pois como o meio de transmissão é analógico, o sinal digital modula uma portadora analógica que envia a informação que é demodulada no receptor (ALENCAR, 2009).

Um sistema de TV Digital é composto de um conjunto de padrões relacionados ao vídeo e ao áudio, que são os serviços essenciais na difusão da TV digital. A novidade em relação à TV Analógica é o surgimento de novos serviços, como interatividade, *e-commerce*, disponibilizados por meio do *middleware* (Ver Figura 1). Outra característica da TV Digital é a possibilidade da transmissão de vídeos em alta definição, a HDTV (*High Definition Television*). Embora isso já fosse possível com a TV Analógica, restrições técnicas e econômicas não permitiram a adoção global da HDTV analógica (era necessário praticamente o dobro da banda dos sistemas de TV usados na época).

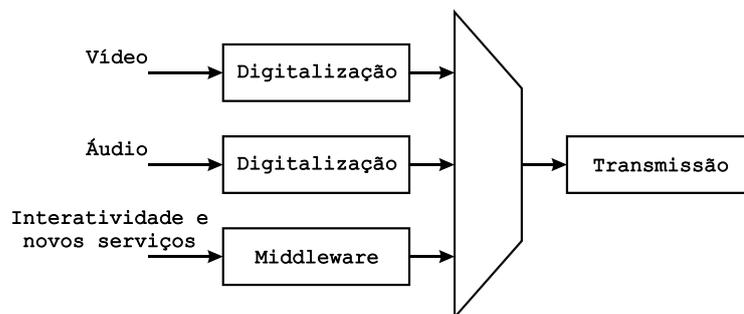


Figura 1 – Conjunto de padrões em um sistema de TV Digital.

Um sistema de alta definição fornece uma qualidade de imagem superior ao analógico, uma imagem mais larga (razão de aspecto de 16:9 em vez da 4:3 analógica, ou 4:3 estendida em televisores 16:9), como mostra a Figura 2, e também vários canais de som estéreo, possibilitando existir diversos idiomas disponíveis para um mesmo programa.



Figura 2 – Diferenças entre as razões de aspecto de vídeo.

A principal diferença entre a TV convencional e a HDTV não é a razão de aspecto, mas sim a quantidade de detalhes da imagem. Os sistemas de HDTV atuais podem ter as seguintes características:

- 720p - 720 linhas ativas por imagem, varredura progressiva, 60 campos/segundo e resolução de 1280x720 pixels;
- 1080i/p - 1080 linhas ativas por imagem, varredura progressiva ou entrelaçada, 60 campos/segundo e resolução de 1920x1080 pixels.

A diferença entre varredura progressiva e entrelaçada está ilustrada na Figura 3:

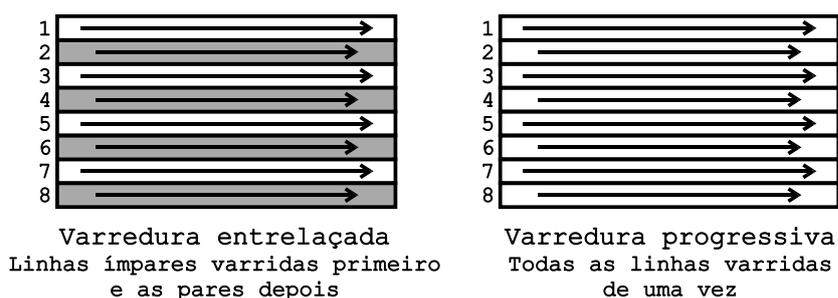


Figura 3 – Varredura entrelaçada e progressiva.

A imagem é formada pela varredura de campos/segundo. No método progressivo cada campo equivale a um quadro do vídeo; no modo entrelaçado cada frame equivale à junção de dois campos, compostos por linhas ímpares e pares. Essa diferença na formação da imagem leva a uma redução da largura de banda pela metade no método entrelaçado, o que otimiza a transmissão, mas leva a alguns problemas na formação da imagem, principalmente quando os objetos gravados se movem muito rápido. A EBU (*European*

Broadcasting Union), por exemplo, recomenda a utilização da varredura progressiva, por este método fornecer uma qualidade de imagem maior (EBU, 2014).

Um canal de TV Digital pode ainda transmitir programas em SDTV (*Standard Definition Television*) com uma resolução de 640x480 pixels, sendo que um programa em SD ocupa em torno de 1/4 da banda de um programa em HD. Também pode transmitir programas em EDTV (*Enhanced Definition Television*) com 720x480 pixels e varrimento progressivo e em LDTV (*Low Definition Television*), com 320x240 pixels, que é a resolução de transmissão do *OneSeg*, faixa de frequência destinada à transmissão do sinal de TV para dispositivos móveis. Há ainda os formatos 4K e 8K, em desenvolvimento, com 4096x2160 e 8192x4320 pixels, que se enquadram na categoria de UHD TV (*Ultra HDTV*).

1.1.1 *Middleware* e Interatividade

O *middleware* é a camada de *software* ou plataforma de programação entre o sistema operacional (da TV, nesse caso) e suas aplicações, e permite serviços de interatividade na TV Digital. O seu principal objetivo é oferecer um conjunto de ferramentas que possibilitem a interoperabilidade dos sistemas de transmissão de vídeo, seja via satélite, cabo, redes terrestres ou micro-ondas. O *middleware* possui um *software* que tem acesso ao fluxo de vídeo, áudio e de dados, roteando-os para um elemento de saída ou armazenamento. Ele pode receber comandos de entrada dos dispositivos do telespectador, como o controle remoto ou um teclado, e enviar informações para a tela da TV (ALENCAR, 2009).

A interatividade em um sistema digital é fornecida principalmente pelo processamento da informação armazenada. Deve existir um armazenamento local de informação ou um canal de interatividade (canal de retorno). O armazenamento de informação pode ser alcançado com *set-top boxes* ou diretamente na própria TV com conversor integrado. A Figura 4 ilustra o processo de difusão e interatividade (ALENCAR, 2009).

A interatividade pode acontecer de três formas distintas: sem um canal de retorno, com as informações sendo transmitidas pelo canal de difusão e armazenadas no aparelho em questão, como por exemplo a EPG (*Electronic Programming Guide*, a grade de programação); com um canal de retorno *simplex*, em que a informação do telespectador é enviada por meio dele (por exemplo, em uma votação), e recebida geralmente pelo canal de difusão; e com um canal de retorno *half* ou *full-duplex*, onde a informação é enviada e recebida através desse canal, como em uma compra através da TV em que é necessária a confirmação desta: a informação do pedido é enviada, e a confirmação é recebida pelo canal de retorno.

A implementação do canal de retorno é desafiadora, tendo em vista a quantidade de canais individuais a serem implementados e a concepção de uma rede para gerenciar essas conexões. Os principais meios estudados para a criação do canal de retorno são:

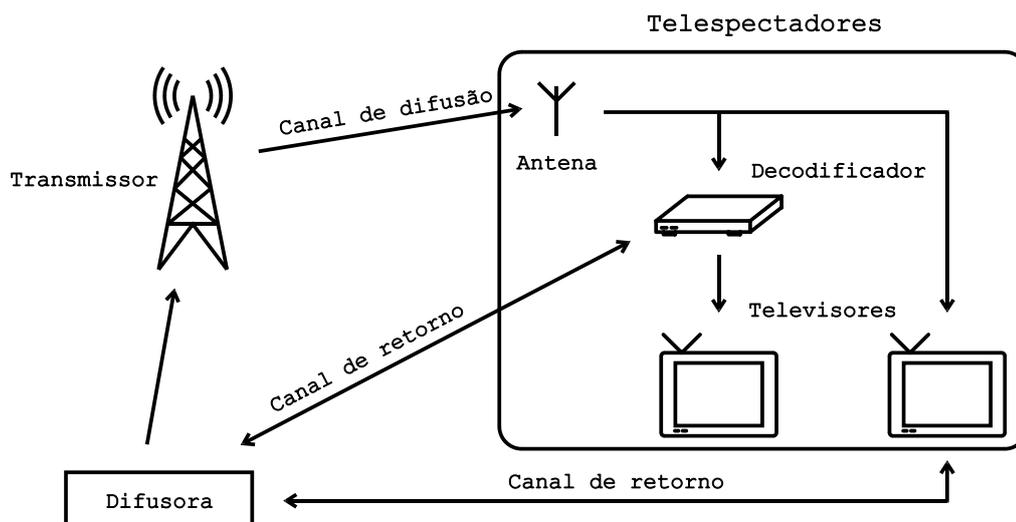


Figura 4 – Difusão e interatividade em um sistema de TV Digital.

internet (3G ou satélite, por exemplo), modems *dial-up*, tecnologia ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), SMS (*Short Message Service*) e até mesmo PLC (*Power Line Communication*) (CARVALHO, 2006). Com a implementação completa do canal de retorno vários serviços que podem ser oferecidos: televisão individualizada (será possível escolher o que assistir, em que ângulo assistir), compra de filmes, produtos, arquivos de *download* como MP3, acesso à internet direto da TV, entre outros. Além disso, em um mesmo canal de frequência é possível transmitir vários programas em qualidade menor (SDTV, por exemplo), habilitando a escolha de uma programação diferente pelo usuário (ALENCAR, 2009).

1.2 Padrões de TV Digital

Atualmente existem cinco principais padrões de TV Digital no mundo: o padrão americano ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), o padrão europeu DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*), o padrão japonês ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*), o padrão brasileiro ISDB-Tb (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Brazilian Version*) ou SBTVD (Sistema Brasileiro de Televisão Digital), baseado no padrão japonês e o padrão chinês DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*). As principais similaridades entre esses padrões são: mesma faixa de frequência de transmissão (UHF, *Ultra High Frequency*, que vai de 300 MHz a 3 GHz), igual razão de aspecto (16:9), suporte a multicanais de áudio, além de especificações para transmissão via satélite, cabo ou terrestre. A Tabela. 1 mostra as especificações para transmissão terrestre (ALENCAR, 2009).

Quanto à adoção desses padrões de TV, o mapa da Figura 5 mostra os países que

	ATSC	DVB-T	ISDB-T	ISDB-Tb	DTMB
Digitalização de vídeo	H.264	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2	MPEG-2
Digitalização de áudio	Dolby AC3	MPEG-2 ACC	MPEG-2 AAC	H.264	MPEG-2
Multiplexação	MPEG	MPEG	MPEG	MPEG	MPEG
Transmissão do sinal	Modulação 8-VSB	Multiplex COFDM	Multiplex COFDM	Multiplex COFDM	SCM e MCM
<i>Middleware</i>	DASE	MHP	ARIB	Ginga	IMP

Tabela 1 – Especificações para transmissão terrestre.

os utilizam ativamente ou que apenas os adotaram e ainda irão implementá-los (DTV, 2014).

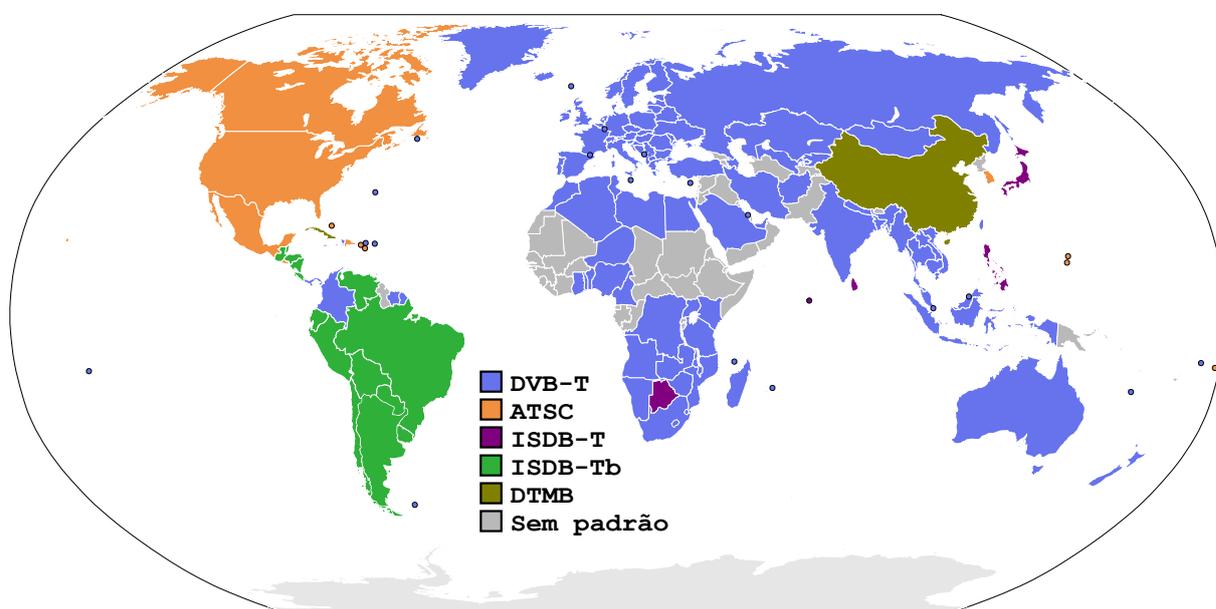


Figura 5 – TV Digital no mundo (Maio de 2014).

1.2.1 ATSC

O padrão ATSC foi criado em 1995 por um grupo de 58 empresas de equipamentos eletrônicos dos Estados Unidos (ATSC, 2013). A versão em vigor do padrão, a 1.0, usa a modulação 8VSB (*Vestigial Side Band*) para a transmissão terrestre. Essa técnica de modulação fornece uma taxa de dados de 19,39 Mbps (38,57 Mbps no modo de alta taxa de dados) em um canal de 6 MHz. Com isso é possível transmitir um programa em HD ou até 4 programas em SD em um único canal de 6 MHz. O fluxo de transporte de dados é o MPEG-2 (*Moving Picture Experts Group*); a codificação de áudio é feita em Dolby Digital (formato AC3, 5.1 canais) e a codificação de vídeo em MPEG-2. Os padrões 2.0 e 3.0, que ainda não entraram em vigor, possuem outras modulações de vídeo: H.264 e H.265, respectivamente. A principal diferença desse padrão para os outros é o tipo de

modulação utilizada, que é 8VSB, ao invés de COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), sendo mais suscetível às atenuações de multipercurso (ATSC, 2013).

O *middleware* utilizado pelo ATSC é o DASE (*DTV Application software Environment*). O DASE adota modelos de aplicações baseados em Java e HTML (versão estendida, *Hyper Text markup Language*). Permite outros tipos de linguagem de programação, como o *JavaScript*. Apesar dessas possibilidades, o advento da interatividade só poderá ser concretizado com a implantação do ATSC 2.0.

1.2.2 DVB-T

O padrão DVB-T foi publicado pela primeira vez em 1997 e tornou-se o padrão de transmissão de TV Digital mais adotado no mundo (Ver Figura 5). O padrão foi desenvolvido para prever as mais diversas necessidades, e por isso é bastante flexível em relação às suas configurações. A modulação usada no DVB-T é a COFDM com 1705 (sistemas 2K) ou 6817 (sistemas 8K) portadoras, e fornece uma taxa de dados entre 5 e 31,7 Mbps, dependendo do tipo de modulação usada (QPSK, 16QAM, 64QAM). Com essas características, assim como no ATSC, é possível transmitir 1 programa em HD ou 4 em SD em um mesmo canal de 6, 7 ou 8 MHz. O fluxo de transporte é o MPEG-2 e os padrões de codificação de áudio e vídeo são o MPEG-2 e o MPEG-2 ACC, respectivamente. Em 2011 foi lançada uma atualização do DVB-T, o DVB-T2 (segunda geração), que tem por principais diferenças a possibilidade de utilização da modulação 256QAM, aumentando a taxa de dados, a adição dos modos 16K (com 13633 portadoras) e 32K (27265 portadoras) e uma largura de banda 10 MHz. Além do DVB-T existem as especificações DVB-S (transmissão via satélite) e DVB-C (transmissão via cabo). (ROHDE-SCHWARZ, 2010)

O MHP (*Multimedia Home Platform*) é uma plataforma *middleware* aberta para a TV Digital voltada para o DVB. Oferece uma API (*Application Programming Interface*) acessível a todos os que desejam desenvolver aplicações interativas baseadas em Java e HTML para receptores e TVs. Foi projetado para funcionar com todas as tecnologias de transmissão DVB.

1.2.3 ISDB-T

A transmissão de TV Digital usando o padrão ISDB-T começou em dezembro de 2003 no Japão, e se difundiu pelo país até dezembro de 2006. O desligamento do sinal analógico no Japão aconteceu em Julho de 2011. O padrão utiliza a modulação COFDM com praticamente as mesmas técnicas que o DVB-T: QPSK, 16QAM e 64QAM com 2K, 4K e 8K portadoras. Seu grande diferencial é a divisão do canal de 6 MHz em 13 segmentos. Essa técnica é chamada de BST-OFDM (*Band-Segmented Transmission OFDM*). Um desses segmentos é dedicado à transmissão móvel (*OneSeg*), que é transmitido juntamente

com programas em HD ou SD em um mesmo canal. É possível então a transmissão de um programa em HD ou até 4 em SD além do *OneSeg*. A codificação de vídeo é feita com base no padrão MPEG-2, o áudio é em MPEG-AAC. A diferença para o *OneSeg* é a codificação de vídeo, feita em H.264. A camada de transporte utiliza o padrão MPEG-2, como praticamente todos os outros padrões. As taxas de dados ficam em torno de 3,65 e 23,23 Mbps (TAKAHASHI, 2007).

O *middleware* do padrão é o ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*). Ele define uma linguagem declarativa denominada BML (*Broadcast Markup Language*) e não possui suporte para linguagens procedurais. Quanto à interatividade, apenas o Japão a possui implementada por meio de um canal de retorno ASDL.

1.2.4 DTMB

O governo chinês iniciou o desenvolvimento do seu padrão de TV Digital em 1994 e finalizou o processo em 2006 após a realização de testes de campo. Ele possui quase as mesmas configurações dos outros padrões, com exceção do tipo de modulação de transmissão, que pode ser feito com uma ou várias portadoras (TDS-OFDM com 2K portadoras), e o canal de transmissão suportado que só pode ser de 8 MHz. As codificações de vídeo e áudio são em MPEG-2, bem como o transporte de dados. Quanto à taxa de dados, pode variar entre 4,81 e 32,49 Mbps, dependendo da modulação, que pode ser em 4QAM-NR, 16QAM, 32QAM ou 64QAM. O *middleware* adotado pelo padrão é o IMP (*Interactive Media Platform*) (ALENCAR, 2009).

1.2.5 ISDB-Tb

De novembro de 1998 até maio de 2000, testes de campo e laboratório foram conduzidos pelo grupo ABERT/SET com os padrões de TV Digital disponíveis na época. Escolheu-se como base o padrão japonês ISDB-T. O projeto para o desenvolvimento do ISDB-Tb foi lançado em 2003, e em fevereiro de 2006 foi publicado o relatório contendo as recomendações do padrão. Os sinais são transmitidos utilizando a transmissão em banda segmentada (BST-OFDM), como mostra a Figura 6. A principal diferença entre o padrão japonês e o brasileiro é a codificação de vídeo: no ISDB-Tb é toda feita em H.264, tanto para programas em SD quanto em HD. O *OneSeg* é transmitido com uma resolução de 320x240 com uma taxa de transmissão de 220 a 320 kbps (ALENCAR, 2009).

A plataforma de *middleware* é o Ginga, que fornece um conjunto de especificações que suportam o ambiente de suas aplicações. Suas especificações em relação à arquitetura e aplicações são projetadas para funcionar na difusão terrestre para receptores de TV Digital. Não há interatividade total pela falta do canal de retorno. Estão sendo estudados vários padrões e tecnologias, ainda sem nenhuma definição. Quanto à TV Analógica, em

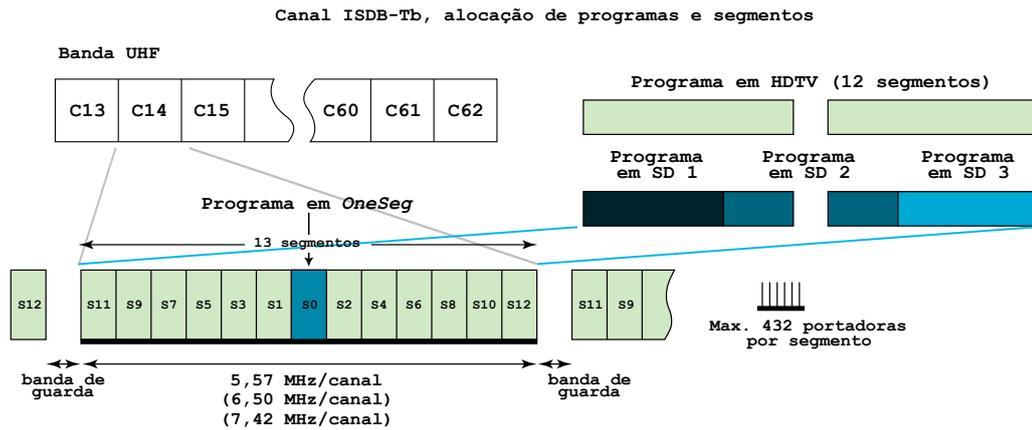


Figura 6 – Alocação de programas e segmentos no ISDB-Tb.

10 de julho de 2014 (através da publicação da portaria 481, de 09/07/14) o Ministério das Comunicações editou as condições para seu desligamento. Uma das condições estabelece que a emissora só poderá cessar a transmissão analógica se pelo menos 93% dos domicílios no município que acessam o serviço livre, aberto e gratuito por transmissão terrestre estiverem aptos a receber o sinal digital. Através dessa condições foi estabelecida uma data para o desligamento da TV Analógica para o Brasil: entre 2015 e 2018 dependendo do estado. As emissoras da Paraíba devem encerrar suas transmissões de TV Analógica até Julho de 2018 (TELECO, 2015).

2 Modelos de Propagação em Radiofrequência

Este capítulo aborda conceitos de radiação eletromagnética, além de caracterizar antenas, para que se entendam os mecanismos de propagação de ondas eletromagnéticas. Por fim são contemplados alguns modelos de propagação que visam prever a atenuação de um sinal transmitido.

2.1 Radiação Eletromagnética

Radiação eletromagnética é a propagação de energia por uma onda composta por dois campos: um elétrico e outro magnético. Um campo elétrico (gerado por uma antena, por exemplo) que varia senoidalmente, gera um campo magnético perpendicular a ele (pela lei de indução de Maxwell); por outro lado, esse campo magnético que também varia senoidalmente, gera um campo elétrico perpendicular a si próprio (pela lei de indução de Faraday). Os dois campos criam continuamente um ao outro através de indução mútua e então se propagam transversalmente (isto é, perpendicularmente às vibrações) como uma única onda. A Figura 7 ilustra esse processo com vários pontos do eixo de propagação, mostrando a formação das ondas senoidais (HALLIDAY; RESNICK, 2014).

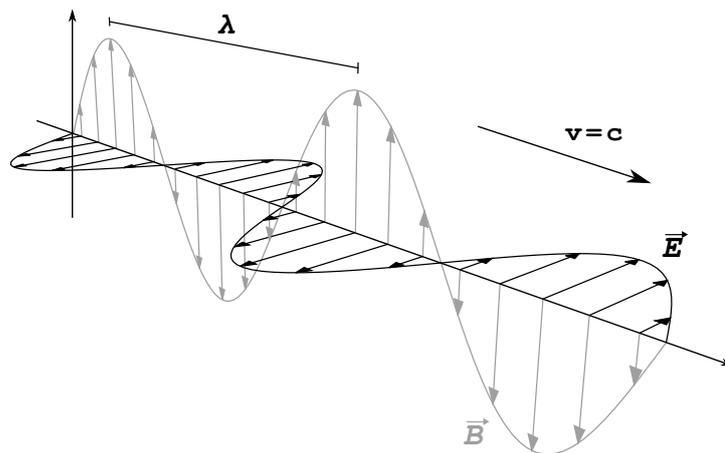


Figura 7 – Onda eletromagnética (v é a velocidade de propagação da onda).

As ondas eletromagnéticas, diferentemente das ondas mecânicas, não precisam de um meio para se propagar. A própria luz, que é uma onda eletromagnética, se propaga pelo espaço sideral (vácuo), por exemplo. Todas essas ondas se propagam na velocidade da luz (no vácuo, com aprox. 300×10^6 m/s). A equação que relaciona o comprimento da

onda, λ , parâmetro importante no estudo da radiação eletromagnética, com sua velocidade de propagação, c , e a frequência das oscilações f , é dada por

$$\lambda = \frac{c}{f} . \tag{2.1}$$

Existem várias denominações para as ondas eletromagnéticas, dependendo de suas características; como as que se enquadram na categoria de luz visível, aquelas nocivas ao organismo (raios gama) ou as ondas de rádio (a transmissão de TV Digital terrestre ocorre na faixa de UHF, por exemplo). Mas elas são precisamente classificadas de acordo com sua frequência ou comprimento de onda. O espectro eletromagnético é dividido como mostra a Figura 8:

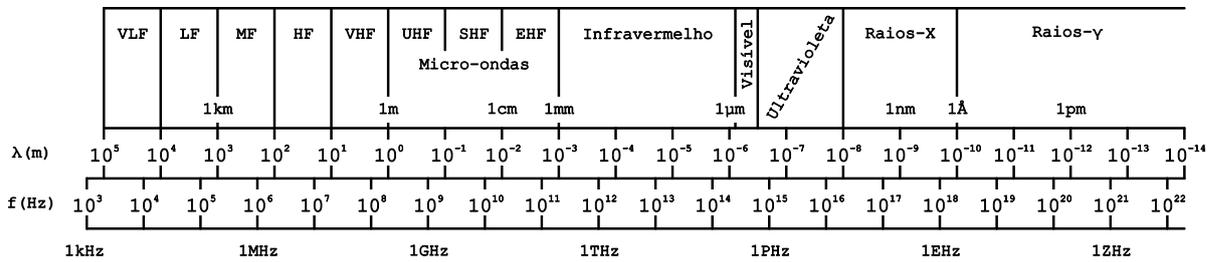


Figura 8 – Espectro eletromagnético.

2.2 Antenas

Um antena é um dispositivo elétrico que pode converter potência elétrica em ondas de rádio (ondas eletromagnéticas que vão de 3 kHz a 3 GHz aproximadamente) ou captar essas ondas e as converter em potência elétrica. É usada geralmente em transmissores ou receptores em radiofrequência. No processo de transmissão é fornecida aos terminais da antena uma corrente alternada oscilando na frequência de transmissão da onda, que por sua vez gera um campo magnético, irradiando assim a energia na forma de uma onda eletromagnética, como explicado na seção anterior. Na recepção, a antena capta parte da potência da onda e produz uma pequena tensão em seus terminais que é amplificada pelo receptor (POOLE, 2014a).

As antenas são caracterizadas por diversos fatores. Alguns deles são explicados abaixo (MARINHA DO BRASIL, 2000):

- **Impedância da antena:** o valor da impedância da antena deve ser casado com a impedância da linha de transmissão ou guia de onda para que a radiação ou recepção seja eficiente. Para transmissões em alta frequência, o comprimento da linha de transmissão deve ser menor que 10% do comprimento da onda transmitida para que a transmissão não seja afetada.

- **Potência irradiada:** é a quantidade de potência que uma antena transmissora propaga. Ela limita a distância de separação entre uma antena transmissora e uma receptora devido à atenuação do percurso da transmissão.
- **Diretividade:** está relacionada à direção em que uma antena irradia ou recebe potência. Dita como as antenas transmissoras e receptoras devem estar posicionadas. Essa característica pode ser analisada através de um diagrama de irradiação (que define a potência irradiada em função da distância e do ângulo azimutal), como o ilustrado na Figura 9. As antenas podem ser divididas, quanto à diretividade, em antenas omnidirecionais (que irradiam ou captam energia igualmente em todas as direções horizontalmente) e antenas direcionais ou diretivas (que irradiam praticamente toda sua potência em uma certa direção). Um caso particular de antena omnidirecional é a antena isotrópica, que idealmente transmite em todas as direções com uma mesma potência.
- **Eficiência:** é a relação entre a potência que a antena irradia e a potência que ela dissipa, e esta deve ser pequena, comparada com a irradiada; isso para que a quantidade de potência necessária na transmissão seja a menor possível.
- **Largura de banda:** descreve a faixa de frequência no qual a antena pode irradiar ou receber propriamente energia. Por exemplo, existem antenas que captam sinais tanto em UHF quanto em VHF (*Very High Frequency*) (possuem uma largura de banda grande), sendo próprias para sinais de TV Analógicos e Digitais.

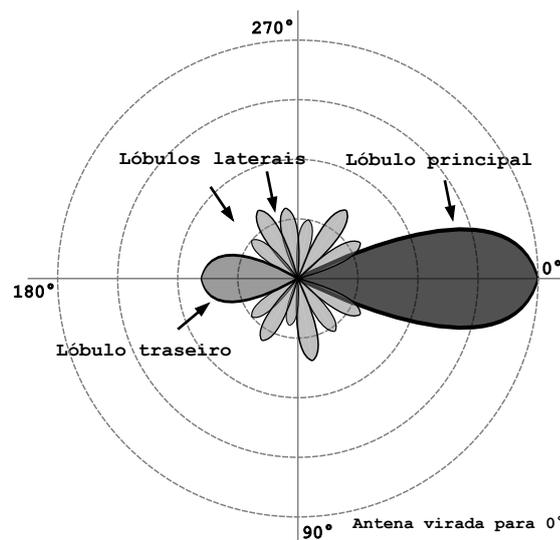


Figura 9 – Exemplo de diagrama de radiação de uma antena.

Existem diversos tipos de antenas que se diferenciam pela faixa de frequências que conseguem irradiar e captar, além de sua diretividade. As antenas omnidirecionais mais

comuns são as de monopolo e dipolo. As antenas diretivas mais comuns são a Uda-Yagi e a parabólica.

2.3 Mecanismos de Propagação

O canal de radiofrequência (onde ocorrem as transmissões de rádio e TV) gera grandes limitações na performance de sistemas de comunicação sem fio. O percurso da transmissão entre transmissor e receptor nem sempre tem uma linha de visada livre: ela pode ser obstruída por prédios, montanhas, entre outros obstáculos, diferentemente de canais com fio. A propagação das ondas eletromagnéticas podem ser atribuída principalmente à reflexão, difração e dispersão (RAPPAPORT, 2002).

2.3.1 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética em propagação se choca contra um objeto que tem grandes dimensões quando comparadas com o comprimento da onda propagante. A reflexão ocorre geralmente na superfície da Terra e nas paredes de construções. Dependendo do que reflete a onda, ela pode ser parcial ou completamente refletida. Se o meio de reflexão em questão for um perfeito dielétrico, parte da energia é transmitida ao meio refletor e parte volta para o meio de transmissão, e não há perda de energia; caso o meio refletor seja um perfeito condutor, a onda é completamente refletida. Como praticamente todos os meios refletores são dielétricos, existem várias perdas na reflexão da onda. A Figura 10 ilustra esse processo (RAPPAPORT, 2002).

2.3.2 Difração

A difração ocorre quando um percurso de rádio entre o transmissor e o receptor é obstruído por uma superfície que tem irregularidades agudas (bordas). As ondas secundárias resultantes da obstrução por meio da superfície seguem o princípio de Huygen, que declara que todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como fontes para a produção de ondas menores, que se combinam para formar uma nova frente de onda, na direção de propagação original ou não. A difração é causada então pela propagação de ondas mais fracas na direção de regiões de sombra, que tem uma obstrução da linha de visada com o transmissor. O processo de difração está ilustrado na Figura 10 (RAPPAPORT, 2002).

2.3.3 Dispersão

A dispersão (*scattering*) ocorre quando o meio pelo qual a onda viaja consiste de partículas que são pequenas se comparadas ao comprimento dessa onda, e quando o

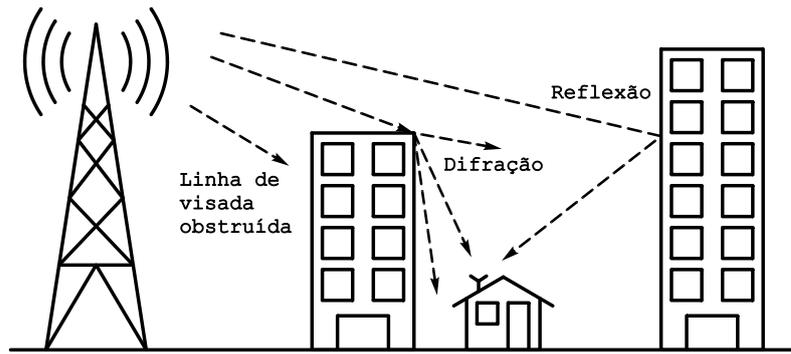


Figura 10 – Refração e difração em uma transmissão de ondas eletromagnéticas.

número desses obstáculos por unidade de volume é alto. Quando as ondas eletromagnéticas se chocam com essas partículas (partículas de gases, de água, sólidas), a onda se dispersa em várias direções (ver Fig 11(a)). Embora claramente prejudicial à uma transmissão comum, esse mecanismo é aproveitado em comunicações à longa distância, que possuem nenhuma ou quase nenhuma linha de visada. O principal exemplo disso é a comunicação por dispersão troposférica: o transmissor envia um sinal de alta potência até a troposfera e boa parte dele volta para a Terra e chega ao receptor, em uma comunicação bem sucedida. A Figura 11(b) mostra como ocorre esse processo (RAPPAPORT, 2002).

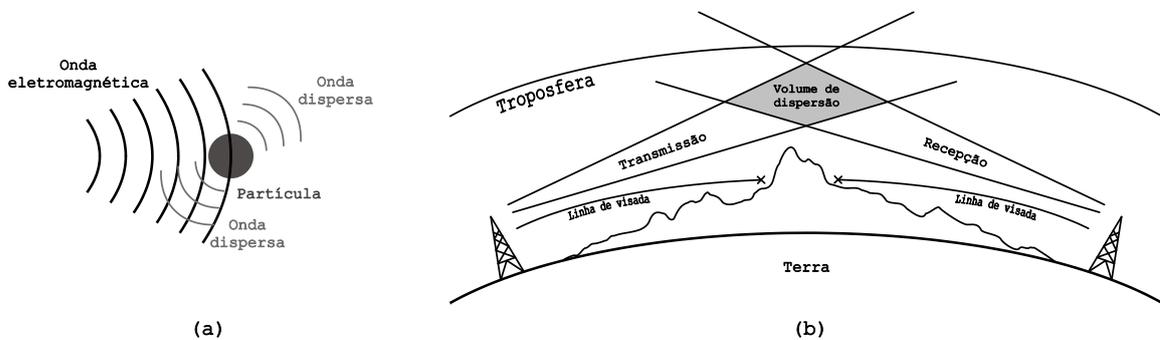


Figura 11 – a. Dispersão em uma partícula. b. Comunicação por dispersão troposférica.

2.3.4 Perdas na propagação

As perdas no percurso de transmissão de um sinal caracterizam-se essencialmente pela redução da densidade espectral de potência de uma onda eletromagnética através do meio em que ela se propaga. Essas perdas têm as mais variadas razões, como as perdas de propagação em um espaço livre, perdas por absorção, difração, multipercurso, terreno e condições atmosféricas, construções e vegetação e a própria disposição dos transmissores e receptores em relação à altura. Essas causas são explicadas a seguir (POOLE, 2014b):

- **Perdas em espaço livre:** as perdas em espaço livre ocorrem conforme o sinal se propaga pelo espaço sem nenhum outro efeito atenuando-o. Mesmo assim, a potência do sinal diminui à medida que este se espalha. Esse fenômeno pode ser imaginado como um sinal de rádio espalhando-se centrifugamente a partir do transmissor em todas as direções. Conforme o sinal cobre um área maior, pelo princípio da conservação de energia, fica evidente que a potência em uma determinada área será menor à medida que a distância cresce.
- **Perdas por absorção:** são perdas que ocorrem quando um sinal passa através de um meio que não é totalmente transparente aos sinais em radiofrequência. O meio então absorve parte da potência da onda, enquanto esta é refratada ou refletida, por exemplo. O único meio totalmente transparente à essas ondas é o vácuo. A principal variável que determina essa atenuação é a frequência da onda, já que o comprimento dela está relacionado diretamente à frequência. Isso se dá porque cada meio age de uma forma diferente para uma faixa de frequências.
- **Difração:** as perdas por difração ocorrem quando um objeto aparece no percurso de propagação; o sinal então pode difratar ao redor do objeto, com perdas. Essas perdas são mais evidentes em objetos com formas arredondadas, e tendem a ser menores ao redor de objetos com bordas, como os vértices de um prédio (ver Figura 10).
- **Multipercurso:** em um ambiente real de comunicação, um sinal, ou mesmo vários sinais, são refletidos e chegam ao receptor por meio de diversos caminhos. Dependendo das fases desses sinais eles podem se somar ou subtrair. Se o receptor se move, o sinal recebido total varia de acordo com a posição.
- **Terreno e condições atmosféricas:** o terreno pelo qual o sinal viaja tem um efeito significativo na atenuação deste. Montanhas, serras, obstruem o percurso e atenuam consideravelmente o sinal. Outro fator concernente ao terreno é a umidade: terrenos pantanosos, úmidos, tendem a propagar melhor um sinal de onda longa, diferentemente de terrenos secos. As condições atmosféricas também influenciam na comunicação, principalmente em altas frequências. Fatores como chuva, nuvens, umidade e até fumaça são determinantes na dispersão do sinal.
- **Construções e vegetação:** para aplicações em radiofrequência as construções e outras formas de obstrução, incluindo a vegetação, têm um efeito considerado, já que as construções (normalmente prédios) além de refletir o sinal ainda absorvem parte dele. As árvores e suas folhagens também atenuam o sinal, principalmente quando molhadas.

2.4 Modelo de Propagação em Espaço Livre

O modelo de propagação em espaço livre é usado para estimar a potência do sinal que chega ao receptor quando este possui uma linha de visada desobstruída com o transmissor e não há reflexão do sinal no percurso. Tipicamente os enlaces de comunicação em que existe essa linha de visada são as comunicações via satélite e em microondas. O modelo prediz que a potência recebida decai em função da distância entre transmissor e receptor. A potência recebida pela antena receptora é dada pela equação de espaço livre de Friis, dada por (RAPPAPORT, 2002)

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.2)$$

em que P_t é a potência transmitida, $P_r(d)$ é a potência recebida em função da distância entre o transmissor e o receptor em metros, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente, L é o fator de perda do meio não relacionado à propagação em si ($L \geq 1$) e λ é o comprimento da onda em metros. As potências transmitida e recebida tem a mesma unidade, os ganhos das antenas são adimensionais e o fator de perda está relacionado à atenuação do meio, perdas em filtros e perdas da própria antena. Um valor unitário de L indica que não há perdas na transmissão.

O ganho de uma antena está relacionado à sua abertura efetiva, A_e , por (RAPPAPORT, 2002)

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

A abertura efetiva da antena está relacionada à seu tamanho físico. O comprimento da onda está relacionado à frequência da portadora pela Equação 2.1.

Na forma logarítmica, as perdas no percurso da transmissão são calculadas por

$$L_{fs}(d) = -147,6 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \quad (dB) \quad , \quad (2.4)$$

em que f é a frequência da portadora transmitida.

Vale ressaltar que o modelo de espaço livre de Friis é válido apenas para distâncias que estão na região de campo distante, ou região de Fraunhofer (RAPPAPORT, 2002). É definida como a região além da distância de campo distante d_f , relacionada à maior dimensão linear da abertura da antena transmissora e ao comprimento da onda. Essa distância é dada por:

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

em que D é a maior dimensão linear da antena. Outras duas relações devem ser satisfeitas para que o valor de d_f seja válido e estas são descritas abaixo

$$\begin{aligned} d_f &\gg D \\ d_f &\gg \lambda . \end{aligned} \quad (2.6)$$

Como a Equação 2.2 não pode ser usada para distâncias abaixo da distância de Fraunhofer, e para facilitar os cálculos, utiliza-se frequentemente uma distância d_0 como um ponto de referência para a potência recebida. Esse ponto está na região de campo distante, e pode ser calculado com o próprio modelo de espaço livre ou medido com algum equipamento, realizando-se a média das medições no raio descrito por d_0 . Utilizando esse valor, o cálculo da potência no receptor pode ser conduzido utilizando (RAPPAPORT, 2002)

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad d \geq d_0 \geq d_f . \quad (2.7)$$

Para visualizar os valores de atenuação para uma dada frequência utilizou-se a Equação 2.4. O gráfico da Figura 12 mostra o resultado desse cálculo para uma frequência de 500 MHz e a distância variando até 100 km. Pode se observar nesta figura que as perdas aumentam com o aumento da distância de forma logarítmica.

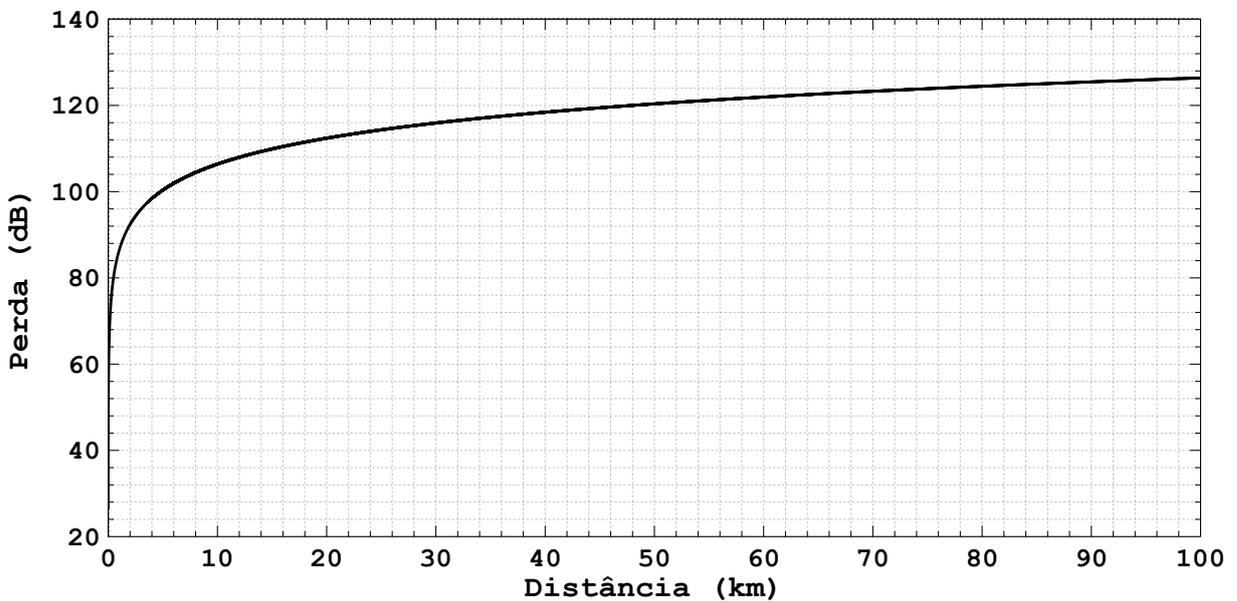


Figura 12 – Perdas em função da distância (Modelo de propagação em espaço livre).

2.5 Modelo de Propagação Log-distância

O modelo de propagação log-distância é um modelo genérico que pode ser visto como uma extensão do modelo de espaço livre de Friis, oferecendo uma predição para variados tipos de ambientes, o que o modelo em espaço livre não leva em conta. As perdas no percurso são estimadas para pontos em distâncias acima da distância de campo longo, d_f (de acordo com a seção anterior) (RAPPAPORT, 2002). Outro fator considerado no cálculo da atenuação é a potência em um ponto de referência de d_0 acima da distância de campo longo. A estimação da atenuação dada por

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (2.8)$$

em que $PL(d_0)$ é a perda calculada ou medida no ponto de referência, $PL(d)$ é a perda para uma dada distância d maior ou igual à distância de referência, n é o expoente das perdas no percurso e X_σ é o valor de uma distribuição gaussiana aleatória com $\mu = 0$ e desvio padrão σ . O valor de n está relacionado ao ambiente em que ocorre a propagação. Os valores usuais são encontrados na Tabela 2.

Ambiente	Expoente de perda n
Espaço livre	2
Área urbana	2,7 a 3,5
Área urbana sombreada	3 a 5
Dentro de um edifício	1,6 a 1,8
Obstruído em um edifício	4 a 6
Obstruído em uma fábrica	2 a 3

Tabela 2 – Valores de n para diferentes ambientes.

O parâmetro X_σ entra na equação para que o efeito de sombreamento - quando um obstáculo põe o receptor em uma área de "sombra", obstruindo a passagem do sinal (ver Figura 10) - seja levado em conta. O desvio padrão dessa distribuição é obtido através de diversas medidas para uma mesma distância do transmissor. No gráfico da Figura 13 é mostrada a aplicação da Equação 2.8, para uma frequência de 500 MHz, e um comprimento máximo D de 1 m para a antena transmissora, o que através da Equação 2.5 leva a $d_f = 3,33m$. Foi assumido que $d_0 = 130m$, e para essa distância $PL(d_0) = 62dB$. Assumindo-se que não havia sombreamento ($X_\sigma = 0$), a equação foi aplicada pra os dois extremos de uma transmissão em área urbana, encontrados na Tabela 2.

2.6 Modelo de Okumura-Hata

O modelo de Okumura-Hata foi desenvolvido por Hata como uma aproximação das curvas empíricas obtidas por Okumura para que fosse possível o cálculo das perdas

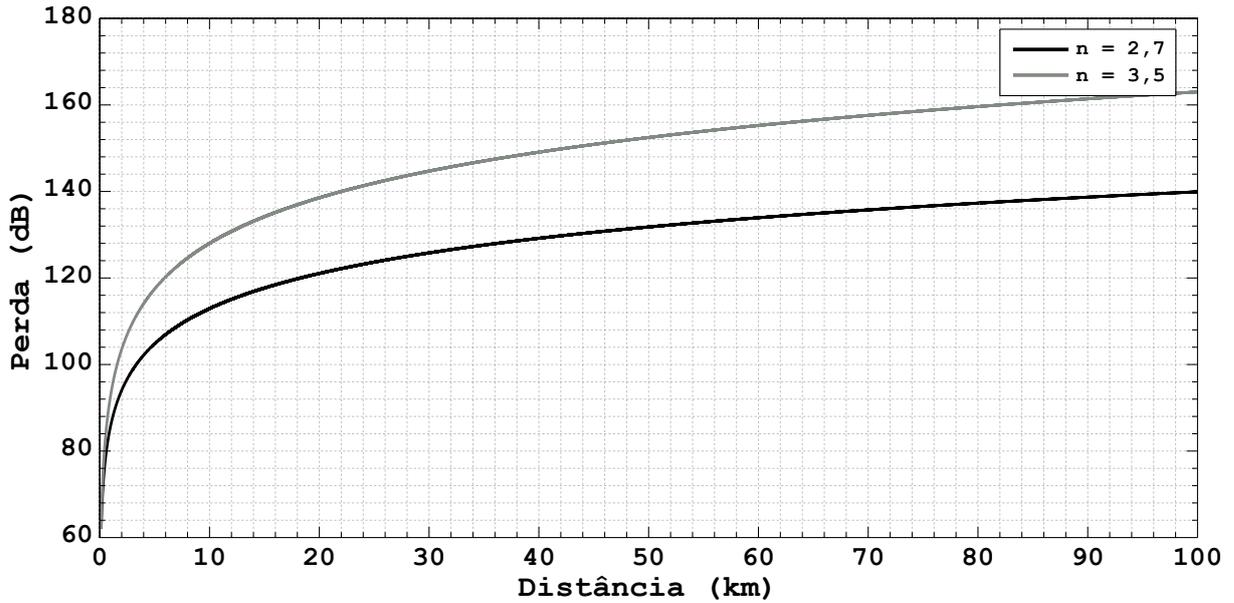


Figura 13 – Perdas em função da distância (Modelo de propagação log-distância).

no percurso por métodos computacionais (RAPPAPORT, 2002). É um dos métodos mais utilizados para a predição das perdas na propagação de sinais em VHF e UHF. Para se alcançar um valor de perda são usados vários parâmetros, como a frequência da portadora, alturas do transmissor e receptor e a densidade das construções existentes no percurso de propagação. Para tornar o modelo simples, considera-se uma propagação entre antenas isotrópicas e o terreno é assumido como regular (totalmente plano, sem variações de elevação). A Equação 2.9 mostra o cálculo generalizado da perda (SWAMY; DU, 2010).

$$L = (69,55 + 26,16 \log_{10} f_c - 13,82 \log_{10} h_t) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_r) \log_{10} d - C \quad (dB) \quad (2.9)$$

em que d (em km) é a distância entre transmissor e receptor, h_t e h_r são as alturas do transmissor e receptor, respectivamente, f_c (em MHz) é a frequência da portadora transmitida e C é um fator de correção relacionado à área em que ocorre a propagação e à altura do receptor. Para que o modelo seja perfeitamente aplicável é necessário que os parâmetros estejam dentro das seguintes especificações: d entre 1-100 km, h_t entre 30-200 m, h_r entre 1-10 m e f_c entre 150-1500 MHz. Os valores de C são calculados a partir das equações a seguir. Para áreas suburbanas:

$$C = 2 \log_{10}^2 \left(\frac{f_c}{28} \right) + 5,4 \quad (2.10)$$

Para áreas abertas ou rurais:

$$C = 4,78 \log_{10}^2 f_c + 18,33 \log_{10} f_c + 40,94 \quad (2.11)$$

E para áreas urbanas:

$$C = \begin{cases} 3,2 \log_{10}^2(11,75h_r) - 4,97, & \text{cidades grandes, } f_c \geq 300\text{MHz} \\ 8,29 \log_{10}^2(1,54h_r) - 1,1, & \text{cidades grandes, } f_c < 300\text{MHz} \\ (1,1 \log_{10} f_c - 0,7)h_r - (1,56 \log_{10} f_c - 0,8), & \text{cidades pequenas ou médias} \end{cases} \quad (2.12)$$

Para fins de comparação a Figura 14 mostra as curvas de perda para cada um os valores de C que poderiam ser usados neste trabalho, com altura do transmissor de 100 m, altura do receptor de 5 m e frequência de 500 MHz.

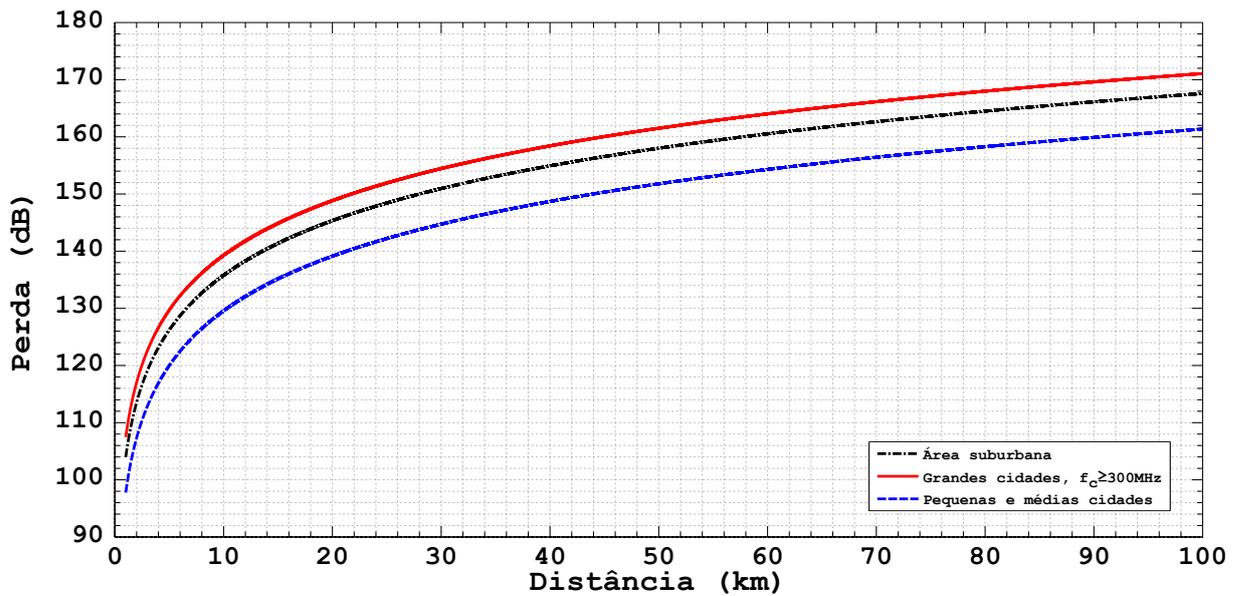


Figura 14 – Perdas em função da distância (Modelo de propagação Okumura-Hata).

3 Redes Neurais Artificiais

Neste capítulo serão introduzidas as Redes Neurais Artificiais (ou simplesmente Redes Neurais ou RNA) e suas importantes características, que levaram à sua escolha como meio de estimar a cobertura do sinal de TV Digital neste trabalho.

3.1 Definição

A utilização de Redes Neurais Artificiais foi motivada pelo reconhecimento de que o cérebro humano executa cálculos de uma forma diferente de um computador digital. O cérebro pode ser visto como um computador altamente complexo, não-linear e paralelizado. Ele tem a capacidade de organizar seus elementos estruturais, os neurônios, a fim de conseguir realizar vários tipos de cálculos (reconhecimento de padrões, percepção, controle motor) muitas vezes mais rápido do que um computador. Além disso, o cérebro realiza essas tarefas rotineiramente, em pouquíssimo tempo (principalmente tarefas de reconhecimento perceptual), ao passo que tarefas com menos complexidade demoram mais para serem realizadas mesmo em um computador poderoso (HAYKIN, 2009).

Em sua forma mais geral, uma rede neural pode ser vista como uma máquina que é projetada para modelar a forma com que o cérebro realiza uma tarefa em particular ou uma função de interesse. Ela geralmente é implementada por meio de circuitos eletrônicos ou em algum tipo de *software*. Para que se alcance um bom desempenho, as redes neurais empregam unidades computacionais simples, também chamadas de neurônios ou unidades de processamento. Uma definição mais formal de rede neural pode então ser formulada (HAYKIN, 2009):

"Uma rede neural é um processador massiva e paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples e que possui uma propensão natural para guardar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso."

3.1.1 Características

A rede neural, por ter o processamento altamente paralelizado, possui um grande poder computacional e uma grande capacidade de aprender e generalizar. A generalização é a capacidade da rede de fornecer respostas às entradas não apresentadas durante um treinamento (aprendizado). Essas duas principais características das redes neurais tornam possível a solução de problemas complexos que antes eram intratáveis, ou não poderiam ser modelados ou sintetizados por um conjunto de equações. Outras características importantes e úteis das redes neurais são apresentadas a seguir (HAYKIN, 2009):

- **Não-linearidade:** um neurônio artificial pode ser linear ou não-linear. É uma propriedade importante, principalmente se o mecanismo que gera os sinais de entrada é não-linear (como um sinal de fala ou o decaimento da potência do sinal transmitido por uma emissora de rádio ou televisão).
- **Mapeamento de entrada e saída:** capacidade de aprender os padrões que relacionam um conjunto de entradas a um conjunto de saídas. Geralmente isto é alcançado por intermédio de um treinamento supervisionado (que será descrito nas próximas seções). Após o término do treinamento, a rede está apta a fornecer respostas com padrões reconhecidos a entradas diferentes das usadas no treinamento.
- **Adaptividade:** capacidade inerente de adaptar seus pesos sinápticos à mudanças no meio que as cerca. Caso uma rede já tenha sido treinada, é possível um retreinamento para que ela se adapte a novas mudanças que tenham ocorrido no meio (isso para uma operação em um meio estacionário). Quando as características desse meio mudam constantemente, a rede neural pode ser projetada para ajustar seus pesos em tempo real.

3.2 O Neurônio Artificial

O neurônio artificial é uma unidade de processamento de informação fundamental para a operação da rede neural. Ele é constituído de três elementos básicos, ilustrados na Figura 15, e identificados abaixo:

- Um conjunto de sinapses, ou conexões, cada uma delas com um peso, o peso sináptico. Como mostra a Figura 15, um sinal x_j na entrada de uma sinapse j conectada a um neurônio k , é multiplicado por um peso sináptico w_{kj} . O subscrito k indica o neurônio a que o peso está relacionado e j à sinapse a que o peso se refere.
- Um somador, ou combinador linear, para que os sinais de entrada modificados pelos pesos sinápticos sejam combinados. Nesse modelo também é adicionada uma polarização ou *bias*, b_k , responsável por aumentar ou diminuir a entrada final da função de ativação $\phi(\cdot)$.
- Uma função de ativação, para que a amplitude da saída do neurônio seja limitada a um valor finito. Tipicamente estes valores variam nos intervalos de $[0,1]$ ou $[-1,1]$.

Matematicamente, um neurônio k pode então ser descrito pelo par de equações abaixo:

$$u_k = \sum_{j=1}^n w_{kj}x_j \quad (3.1)$$

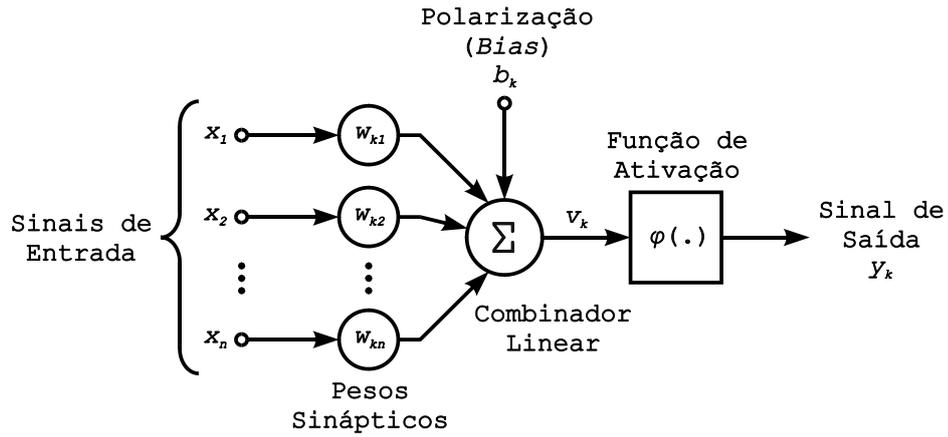


Figura 15 – Modelo de um neurônio artificial não-linear.

e

$$y_k = \phi(u_k + b_k) \tag{3.2}$$

em que x_1, x_2, \dots, x_n são os sinais de entrada; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}$ são os respectivos pesos sinápticos do neurônio k ; u_k é a combinação linear das entradas; b_k é a polarização; $\phi(\cdot)$ é a função de ativação; y_k é o sinal de saída do neurônio e v_k é chamado de potencial de ativação ou campo local induzido.

Outro modelo de neurônio é mostrado na Figura 16, que embora seja diferente, é matematicamente equivalente ao da Figura 15. A diferença é a adição de uma nova entrada, fixada em $+1$, e um novo peso sináptico igual à polarização.

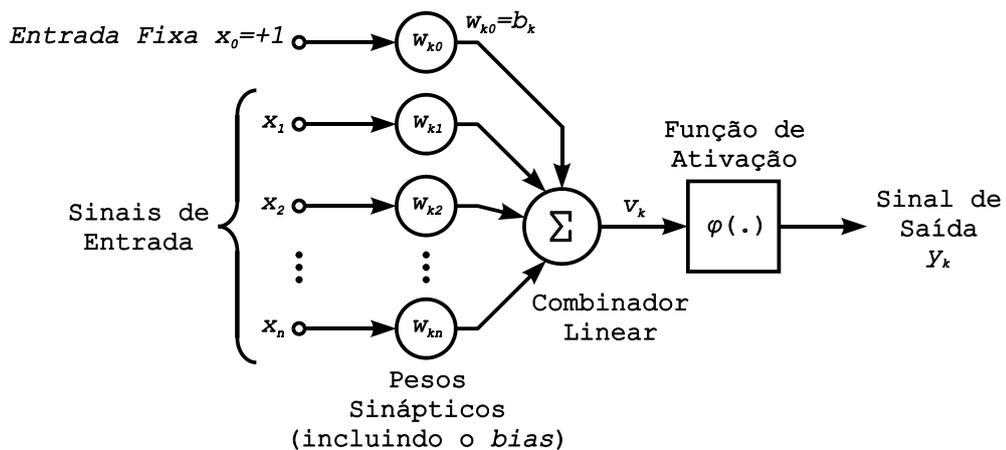


Figura 16 – Modelo modificado de um neurônio artificial não-linear.

3.2.1 Funções de ativação

A função de ativação, $\phi(v)$, define a saída de um neurônio em função do potencial de ativação v . As funções de ativação mais básicas são:

1. **Degrau unitário e função sinal.** São duas funções que podem assumir um número finito de valores. A equação que representa o degrau unitário é mostrada abaixo:

$$\phi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v \geq 0 \\ 0, & \text{se } v < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Esta função também é conhecida como função de Heaviside. A saída do neurônio k é dada então pela Equação 3.4

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se } v_k \geq 0 \\ 0, & \text{se } v_k < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Um neurônio com essa função de ativação é chamado de modelo de McCulloch-Pitts. A Figura 17(a) ilustra o degrau unitário.

Para que haja a possibilidade de existir valores negativos na saída do neurônio, usa-se a função sinal, cujo comportamento é descrito pela Equação 3.5 e ilustrado na Figura 17(b).

$$\phi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v > 0 \\ 0, & \text{se } v = 0 \\ -1, & \text{se } v < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

2. **Função sigmoide e tangente hiperbólica.** A função sigmoide é o tipo mais comum de função de ativação utilizado em redes neurais. A Equação 3.6 representa uma dessas funções.

$$\phi(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \quad (3.6)$$

Nesta equação, a é o parâmetro de inclinação; conforme este parâmetro varia, a inclinação da curva muda. A Figura 17(c) mostra a variação desse parâmetro. A principal diferença entre a função sigmoide e o degrau unitário é que a primeira pode assumir qualquer valor entre 0 e 1, enquanto o degrau assume apenas dois valores.

Para que a saída do neurônio possa assumir valores negativos e valores infinitos nesse intervalo, utiliza-se também a tangente hiperbólica, ou função tan-sigmoide, descrita

pela Equação 3.7. O gráfico da Figura 17(d) mostra o comportamento dessa função.

$$\phi(v) = \tanh(v) = \frac{e^v - e^{-v}}{e^v + e^{-v}} \quad (3.7)$$

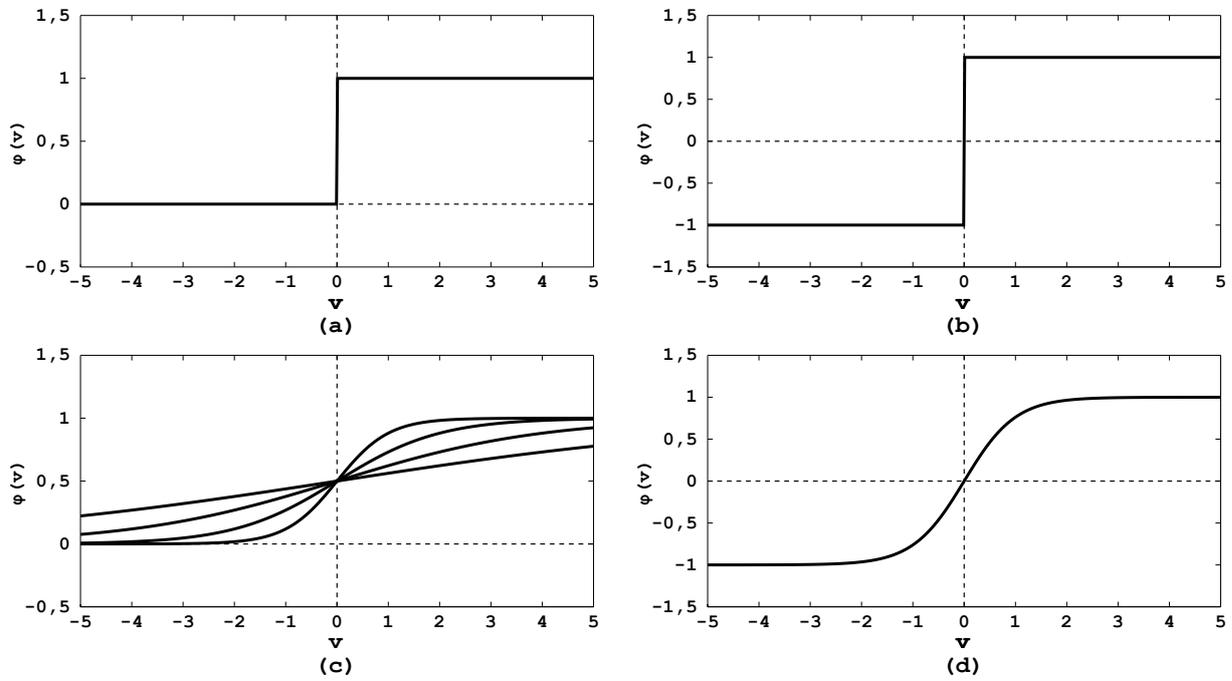


Figura 17 – a. Degrau unitário. b. Função sinal. c. Função sigmoide com a variando. d. Função tan-sigmoide (tangente hiperbólica).

3.3 Arquiteturas de Redes Neurais

A forma com que os neurônios estão estruturados em uma rede neural está diretamente ligada ao tipo de algoritmo de aprendizado utilizado para o treinamento da rede. De forma geral, as redes neurais podem se dividir em três tipos de arquiteturas fundamentalmente diferentes, descritas a seguir.

3.3.1 Redes sem realimentação

3.3.1.1 Camada única

Esse tipo de rede neural é organizada em camadas. Sua forma mais simples é constituída de uma camada de entrada, onde se encontram os nós que recebem os sinais de entrada, e uma camada de saída composta por neurônios (nesse caso, também chamados de nós computacionais). É chamada de rede sem realimentação porque as saídas dos neurônios não são usadas como entrada de outros neurônios. Embora existam duas camadas físicas, o nome de camada única está relacionado à existência de apenas uma delas com neurônios.

A Figura 18 mostra um diagrama de uma rede com 4 neurônios, destacando a divisão em camadas (HAYKIN, 2009).

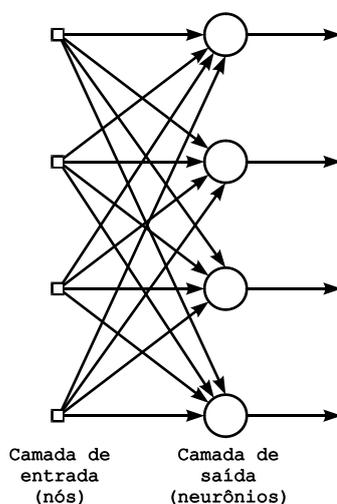


Figura 18 – Rede sem realimentação com uma única camada de neurônios.

3.3.1.2 Múltiplas camadas

Esse tipo de arquitetura diferencia-se da primeira pela presença de uma ou mais camadas escondidas ou ocultas. Essas camadas recebem esse nome pelo fato da saída de seus neurônios não estar disponível na saída ou na entrada da rede neural. Com a adição de mais camadas, torna-se possível para a rede extrair padrões mais refinados de suas entradas. Isso ocorre devido à quantidade maior de sinapses, levando a um maior número de interações neurais. Os sinais que chegam na camada de entrada são distribuídos na primeira camada escondida; o potencial de ativação dos neurônios dessa camada serão os sinais de entrada da próxima camada, e assim por diante. O diagrama da Figura 19 mostra uma rede neural com apenas uma camada oculta, com todas as conexões possíveis. Ela é definida como sendo uma rede 6-4-2, por possuir 6 nós de entrada, 4 neurônios ocultos e 2 neurônios de saída (HAYKIN, 2009).

3.3.2 Redes recorrentes ou realimentadas

Diferencia-se das citadas anteriormente por possuir pelo menos um laço de realimentação. Como mostrado na Figura 20, esse tipo de rede pode ser constituído por apenas uma camada de neurônios, cujos sinais de saída são realimentados como entradas para os outros neurônios, com um atraso. Há a possibilidade dessas redes terem seus neurônios utilizando seus próprios sinais de saída (o que não acontece na rede ilustrada na Figura 20). Também é possível a existência de neurônios escondidos. Outro detalhe importante é que os laços de realimentação possuem elementos que atrasam as saídas dos neurônios (z^{-1}), para que a reutilização dos sinais seja sincronizada (HAYKIN, 2009).

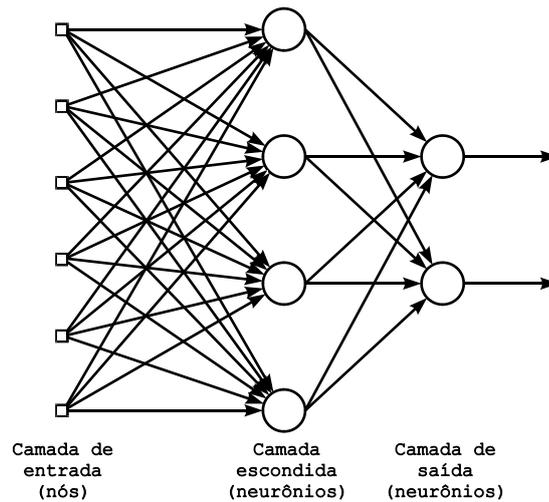


Figura 19 – Rede sem realimentação com duas camadas de neurônios (uma camada oculta e outra de saída).

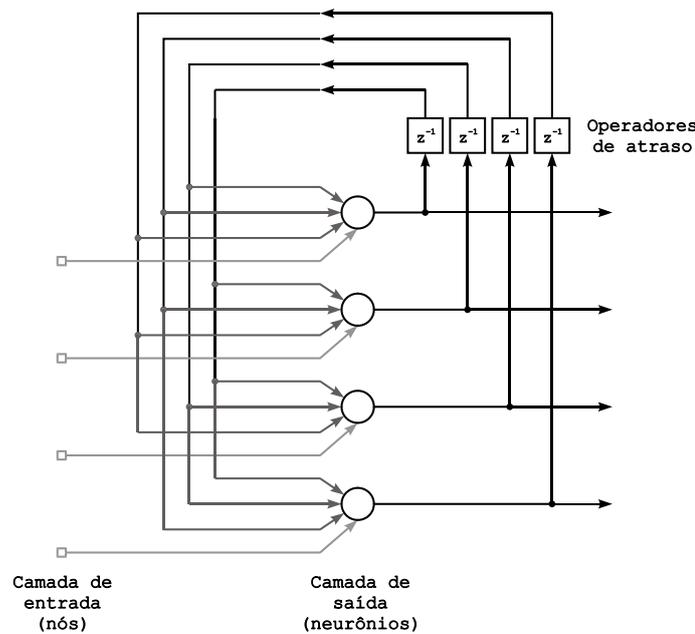


Figura 20 – Rede recorrente com 4 laços de realimentação sem neurônios escondidos.

3.4 Processos de Aprendizado

De uma forma geral, os processos de aprendizado ou treinamento das redes neurais podem ser classificados em: aprendizado supervisionado, aprendizado não-supervisionado e aprendizado por reforço (HAYKIN, 2009). Por simplicidade apenas o supervisionado será abordado.

Nesse tipo de aprendizado, conceitualmente, o supervisor, ou professor, conhece o meio e pode ensinar ou treinar a rede neural para que ela se adapte a este meio, desconhecido

a ela. Esse conhecimento é representado na forma de um conjunto de exemplos de entrada e saída, também chamado de vetor de treinamento. Supondo que este vetor seja apresentado ao supervisor e à rede neural, que desconhece o que estes valores representam, o supervisor apresentará a resposta desejada à informação apresentada, enquanto a rede apresentará uma resposta com erro. Esse processo é ilustrado no diagrama da Figura 21. Os parâmetros da rede neural (isto é, as sinapses e seus pesos sinápticos) serão ajustados por meio do vetor de treinamento e do sinal de erro, que é a diferença entre a resposta desejada e a resposta atual da rede neural (HAYKIN, 2009).

Esse processo acontece passo a passo, tendo como objetivo final emular o comportamento do supervisor. Após o aprendizado estar completo, todo o conhecimento fornecido pelo supervisor é passado à rede, e armazenado na forma de pesos sinápticos fixos (eles variaram durante todo o treinamento, adaptando-se ao vetor de treinamento e ao sinal de erro). Assim a rede neural se torna apta a lidar com o meio sozinha. Para a avaliação do desempenho da rede, utiliza-se geralmente o erro quadrático médio sobre a amostra usada no treinamento.

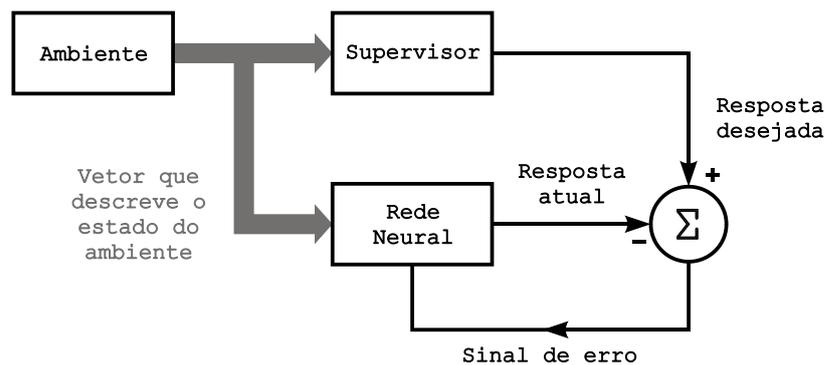


Figura 21 – Diagrama de blocos do processo de aprendizado supervisionado.

4 Campanha de Medições e Desenvolvimento do Modelo de Cobertura Utilizando RNA

Neste capítulo serão mostrados os métodos utilizados na condução das medições, bem como os equipamentos utilizados nelas. Será abordado também o modelo de RNA escolhido para estimar a cobertura, considerando as medições de intensidade de sinal realizadas na cidade de João Pessoa, estado da Paraíba.

4.1 Sistemas de Coordenadas Geográficas

As coordenadas geográficas do globo terrestre são representadas por latitudes e longitudes. As latitudes vão de 0 a 90 graus (norte ou sul) e as longitudes de 0 a 180 graus (leste ou oeste). No esferoide WGS84, principal modelo da superfície terrestre, um grau ($^{\circ}$) latitudinal equivale a 111,6 km, enquanto um longitudinal equivale a 111,3 km (na linha do equador). Outra forma de representar as coordenadas de um ponto na superfície terrestre é através de minutos (que equivalem a uma fração de $1/60$ do grau) e segundos (que equivalem a $1/60$ do minuto). Um minuto ($'$) latitudinal médio é equivalente a uma milha náutica (1852 m), enquanto o longitudinal varia de acordo com as latitudes, pois os meridianos convergem para os polos, diminuindo as distâncias entre si. Porém, devido à proximidade do local estudado à linha do Equador, convencionou-se o minuto longitudinal igual ao latitudinal, com um valor de 1842 m. Como a Terra não é plana, para uma maior exatidão, as distâncias medidas devem levar em conta a curvatura dela; mas isto pode ser desconsiderado para as distâncias máximas encontradas neste estudo (HUMERFELT, 2014).

As informações necessárias para a aplicação dos modelos foram as coordenadas geográficas e a elevação dos pontos dentro da área da cidade. Os dados para o emprego dos modelos de propagação foram obtidos através do site da USGS (*United States Geographic Survey*) no formato DTED (*Digital Terrain Elevation Data*) Nível 1, o que significa que os pontos de elevação fornecidos com suas respectivas coordenadas estão espaçados entre si de aproximadamente 90m (3 segundos)(USGS, 2014). A Figura 22 mostra os dados obtidos em um modelo de elevação para a cidade de João Pessoa. As coordenadas geográficas e elevação dos pontos que foram utilizados no treinamento da rede neural foram obtidos por um dispositivo de GPS (*Global Positioning System*), conforme as suas potências foram medidas.

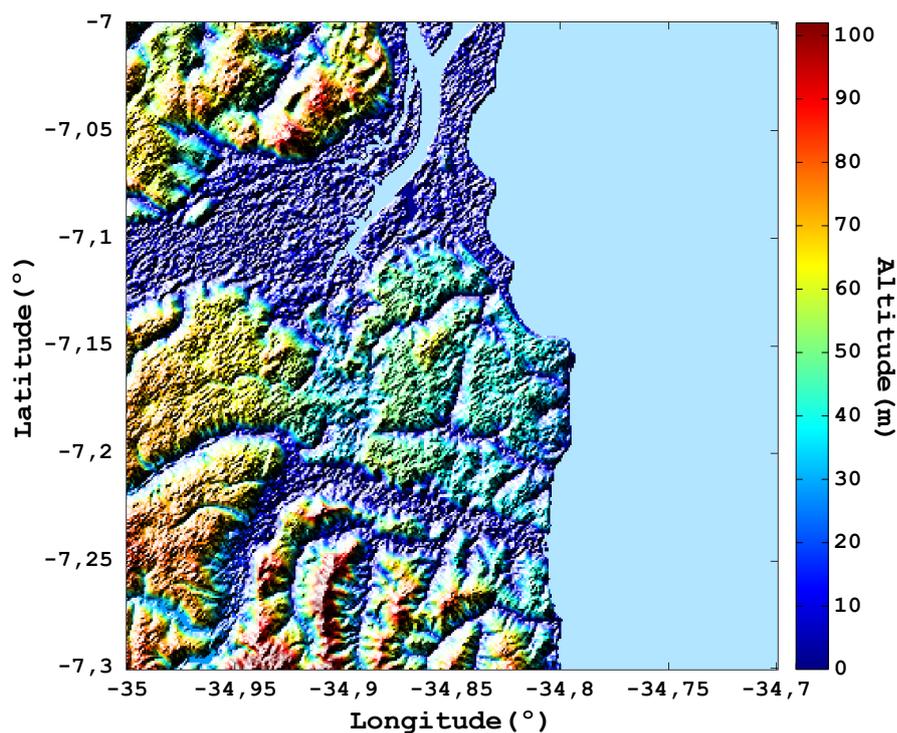


Figura 22 – Mapa de João Pessoa e proximidades (Altitude).

4.2 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão utilizado pela emissora estudada possui um transmissor digital de 2,50 kW e um sistema irradiante composto por vários painéis direcionais dispostos de forma radial, tornando a transmissão praticamente omnidirecional. A utilização desse arranjo confere uma potência ERP de aproximadamente 4,02 kW, sendo ainda possível alterar mecanicamente a quantidade de potência irradiada para uma determinada área. A altura do ponto de transmissão em relação ao solo é de 117 m, e a frequência central das portadoras transmitidas é de 501,25 MHz.

4.3 Sistema de Medição

O sistema utilizado na condução das medições foi composto por:

- Analisador de espectro portátil;
- Antena de UHF externa;
- GPS;
- Computador (*notebook*).

4.3.1 Analisador de espectro

O modelo de analisador de espectro utilizado foi o N9340B, do fabricante *Keysight Technologies*, mostrado na Figura 23. Ele suporta uma faixa de frequências de 100 kHz a 300 GHz, sendo, portanto, apropriado para medir o espectro de UHF. A Figura 24 mostra a tela do analisador para uma banda de aproximadamente 67 MHz, onde os sinais das TV Digital e Analógica estão representados.



Figura 23 – Analisador de espectro portátil N9340B.

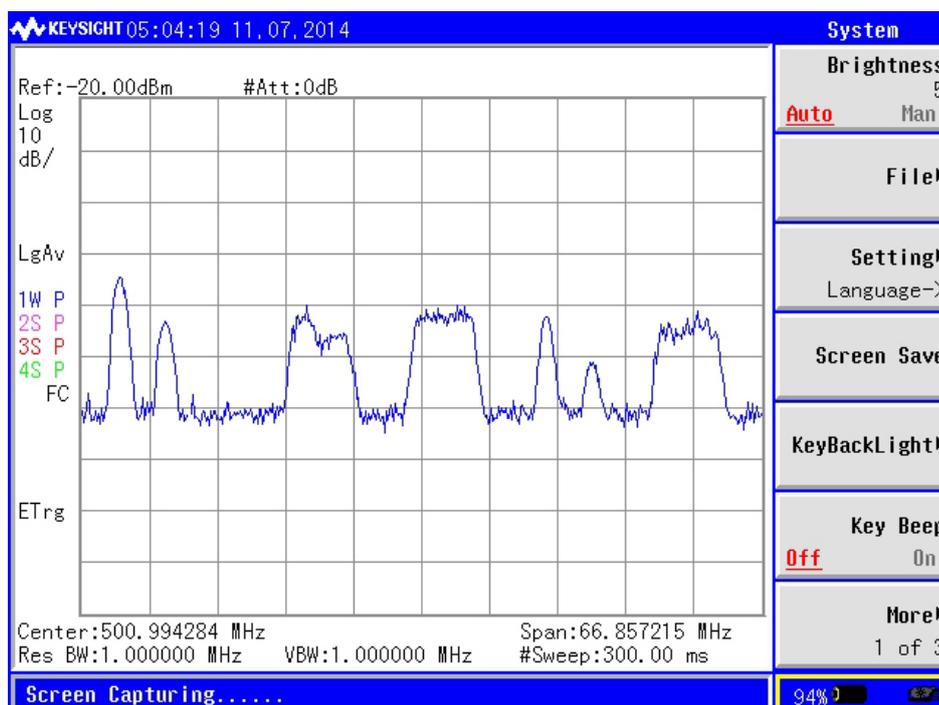


Figura 24 – Espectro com frequência central de 500 kHz e largura de banda de 67 MHz.

Para que as medidas fossem conduzidas satisfatoriamente, dois principais parâmetros deveriam ser ajustados: a atenuação do aparelho e o tempo de varredura (*Sweep Time*). A atenuação deveria ser ajustada para 0 dB para uma recepção ideal do sinal; era impossível distinguir o sinal do ruído sem esse ajuste. O ajuste do *sweep time* para um

valor mais alto se justifica pela melhoria na reprodução do sinal medido pelo analisador de espectro; quanto maior o *sweep time*, menos ruído será apresentado na sua tela.

Outra característica importante deste analisador é a capacidade de comunicação através do padrão VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*), utilizado geralmente para dispositivos de medição e teste. A comunicação é feita através de comandos SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*), que também é um padrão para dispositivos de medição e teste. Isso tornou possível a comunicação do dispositivo com um computador, otimizando as medições; assim elas puderam ser conduzidas mais facilmente, por meio da configuração e leitura automáticas do analisador (AGILENT, 2014).

Segundo dados do próprio fabricante, a potência medida possui uma incerteza de $\pm 1,5$ dB. Para se descobrir a real influência do ruído, interferências e erros nas medições conduzidas, foram tomadas 100 medidas para um mesmo ponto, estimando-se a partir dessas medições o valor esperado (valor médio) e a incerteza associada a elas (desvio padrão).

4.3.2 Antena de VHF/UHF externa

A antena utilizada nas medições foi uma log-periódica externa que funciona nas faixas de VHF e UHF. Ela possui polarização horizontal e um ganho total de aproximadamente 5 dBi (ganho de 5 dB em relação a uma antena isotrópica). As Figuras 25 e 26 mostram a antena e seu diagrama de radiação, respectivamente.

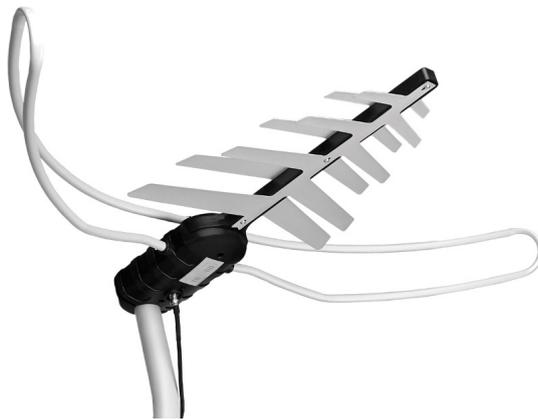


Figura 25 – Antena VHF/UHF log-periódica.

4.3.3 GPS

Para se obter os parâmetros a serem utilizados na rede neural (i.e. as coordenadas e a elevação de um ponto na superfície terrestre), foi usado o GPS eTrex 10, da Garmin (Figura 27). As funcionalidades mais importantes dele são a capacidade de adquirir as

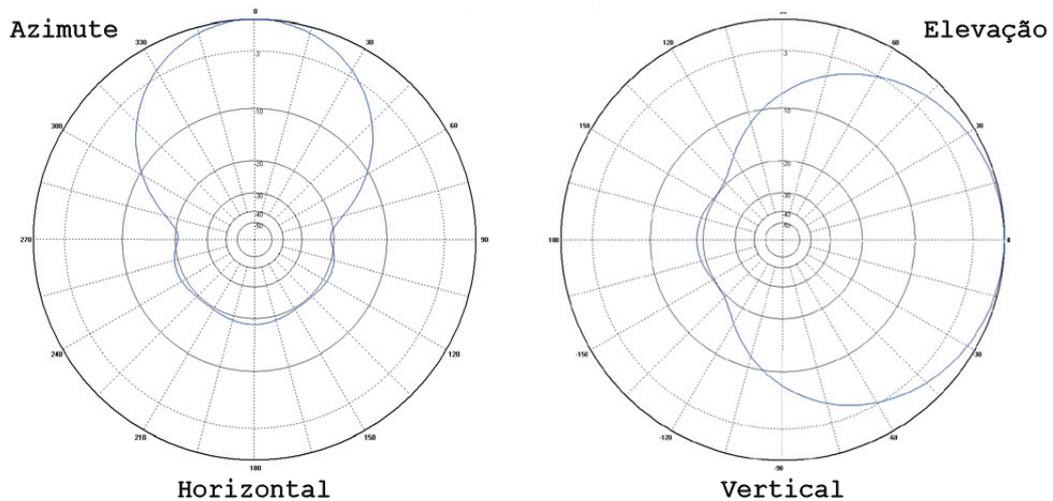


Figura 26 – Diagrama de radiação da antena.

coordenadas de um ponto na superfície terrestre de maneira rápida e organizada e a possibilidade de conexão do dispositivo com o computador, eliminando a tarefa árdua de coletar cada ponto manualmente. O formato de dados salvo no GPS é o GPX (*GPS eXchange Format*), que pode ser decodificado pelo *software* utilizado (MATLABTM), e inclui informações como latitude, longitude, elevação e hora da medição. Outro detalhe é a possibilidade de utilização do GPS com o computador; isso é importante caso a vida útil dele através de pilhas ou baterias seja insuficiente (em torno de 25h de medições ininterruptas, segundo o fabricante).



Figura 27 – GPS Garmin eTrex 10.

4.4 Metodologia das Medições

Inicialmente as medições foram conduzidas abrangendo toda a cidade de João Pessoa. Foram escolhidos percursos pelas principais ruas e avenidas dos bairros, para se fazer uma estimação razoável. Também foi feito um maior número de medições para o bairro dos Bancários, localizado na zona sul da cidade de João Pessoa. Esse bairro foi selecionado devido à sua proximidade com a UFPB, facilitando a condução das medições. Elas foram conduzidas dessa forma para comparar a eficácia do método para uma área abrangente e uma área pequena. O percurso em que as medições foram realizadas está ilustrado no mapa da Figura 28.



Figura 28 – Mapa de João Pessoa com as rotas tomadas.

As medições foram realizadas nos meses de novembro de 2014 e janeiro de 2015. O sistema de medição utilizado foi o apresentado na Seção 4.3. Foi desenvolvido um programa

que se conectava e ajustava os parâmetros do analisador, tais como a frequência central e a janela de frequência (*Span*) através de comandos SCPI. A interface gráfica do programa é mostrada na Figura 29. Para que as medições provenientes do analisador fossem as mais confiáveis possíveis, o programa adquiria 100 pontos do espectro do canal de TV Digital mostrado na tela do analisador; isso foi feito para calcular um valor médio de potência em dBm, aumentando a confiabilidade da medição. Além disso a potência em cada coordenada era medida 100 vezes, e era obtida a média e desvio padrão dessas medições, para que fosse adicionada uma incerteza à elas. A interface gráfica desenvolvida permite outras configurações de frequência central e *pan* além das predefinidas. Ela também mostra a quantidade de medições realizadas e registra as suas variáveis em arquivos de texto. Essas funcionalidades estão expressas nos *scripts* das funções no Anexo C.

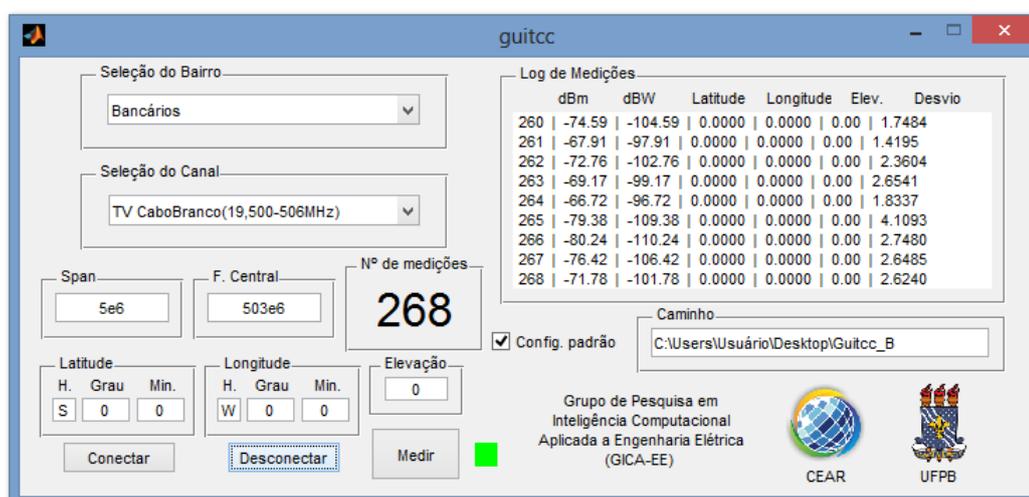


Figura 29 – Interface gráfica do programa de conexão com o analisador, desenvolvida no TCC.

O processo de coleta dos dados foi realizado com uma antena conectada ao analisador e acoplada a um veículo através de um suporte (Figura 30). A altura média da antena foi de 2,1 m. Para medições desse tipo, a ITU (*International Telecommunication Union*) possui um informe (BT.2035-2) que recomenda equipamentos, configurações, e outras medidas a serem tomadas para se alcançar medições satisfatórias (como por exemplo, uma antena com altura de 9,1 m, medidas tomadas na direção radial da antena transmissora)(ITU, 2008). Algumas dessas recomendações não foram seguidas neste trabalho, como a altura da antena receptora. Foi feito dessa forma pelas limitações do projeto, como problemas na mobilidade (veículos não-apropriados). As medidas de potência e as coordenadas foram tomadas simultaneamente, com o veículo parado ou em baixa velocidade, seguindo o percurso da Figura 28. Foram medidos 1180 pontos em toda João Pessoa, e especificamente no bairro dos Bancários foram coletados 162 pontos.

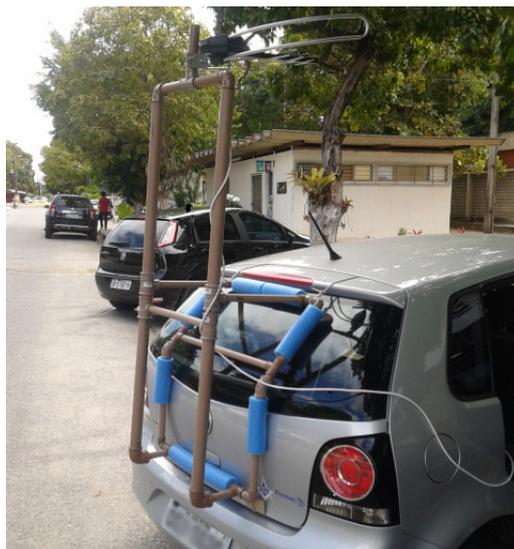


Figura 30 – Antena acoplada ao veículo utilizado (2,1 m de altura).

4.5 Modelos de Propagação e Modelo de RNA Utilizados

Os modelos de propagação foram avaliados a partir das coordenadas obtidas conforme a Seção 4.1. O modelo de propagação em espaço livre foi avaliado utilizando antenas com ganhos unitários. Para o modelo log-distância foi assumida uma transmissão sem sombreamento ($X_\sigma = 0$), em uma área urbana ($n = 3,5$) e uma distância $d_0 = 100m$; para essa distância foi medida a potência, e a perda calculada ($PL(d_0) = 90$ dB). Para o modelo de Okumura-Hata, a altura da antena transmissora utilizada foi de 117 m e a receptora assumida como 2,1 m. O valor de C foi calculado para uma cidade grande com uma portadora de frequência acima de 300 MHz, pois é o pior caso de atenuação. Ainda para este modelo, foi feita uma modificação: a altura da antena receptora foi assumida como sendo a altitude no ponto de recepção acrescida do valor padrão escolhido, de 2,1 m. A distância entre o transmissor e os pontos testados para todos os modelos foi obtida através de trigonometria simples, dada a distância convencional de um minuto, seja longitudinal ou latitudinal (1842 m). A frequência da portadora transmitida utilizada foi de 501,25 MHz. O Anexo A mostra o programa utilizado para realizar esses cálculos.

O modelo de rede neural utilizado foi composto por três parâmetros de entrada: as coordenadas de cada ponto no plano cartesiano, e a sua elevação acima do nível do mar; a saída da rede neural foi a potência em dBm no local em questão. Na Figura 31 está ilustrado esse modelo, onde X, Y e Z são a longitude, latitude e elevação, respectivamente, e P a potência do ponto testado. A arquitetura utilizada foi a de uma rede sem realimentação com múltiplas camadas escondidas (*feedforward*). Os parâmetros adotados para a rede neural, após vários testes, foram os seguintes: 3 camadas escondidas (além da camada de saída) com 50 neurônios cada, uma função de ativação sigmoide e uma função de treinamento que

atualiza os pesos e a polarização de acordo com uma taxa de aprendizagem variável. Esses parâmetros foram obtidos através de tentativa e erro, tratando de minimizar o erro de aproximação no processo de teste. A criação e treinamento padrão da rede neural proposta estão descritos pelo programa do Anexo B.

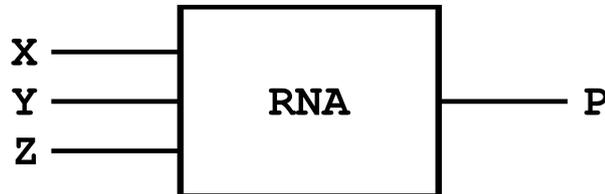


Figura 31 – Modelo utilizado de RNA.

A rede neural foi treinada para três conjuntos de dados, que sua eficácia fosse testada. Primeiramente ela foi treinada para os valores de potência obtidos com o modelo de Okumura-Hata modificado (pois este possui 3 parâmetros de entradas que não são constantes); 70% dos pontos foram escolhidos aleatoriamente para que fossem apresentados à rede, e esta reconhecesse padrões entre eles, reproduzindo a relação entre as coordenadas e a potência do ponto. Os outros 30% foram utilizados para testar a rede; encontrar o erro dos valores reais para os pontos testados e o valor fornecido pela rede neural. O mesmo procedimento foi repetido para os pontos medidos para toda João Pessoa, e para o bairro dos Bancários, com o diferencial sendo a porcentagem, que foi de 90% para treinamento e 10% para testes. A porcentagem de pontos para teste nesses casos foi menor para se obter uma boa quantidade de pontos para treinamento. Foi necessária também a criação de uma função de interpolação que recebesse os dados de latitude e longitude e retornasse um valor de altitude; isso foi feito porque os valores de altitude fornecidos pelo GPS apresentaram variações significativas entre pontos próximos entre si.

5 Resultados

Neste capítulo serão analisadas as medições conduzidas, simulados e comparados os modelos de propagação e de RNA, para verificar a possibilidade de aplicá-los em situações reais.

5.1 Resultados das Medições de Campo

Com o término das medições de campo, os dados foram tratados e então armazenados. Praticamente todas as rotas propostas pela Figura 28 foram tomadas, e algumas medidas feitas nelas estão mostradas na Tabela 3:

Ponto	Bairro	Pot. (dBm)	Desv. Padr.	Lat. (°)	Lon. (°)	Alt. (m)	Dist. (km)
Av. Argemiro de Figueiredo	Bessa	-85,77	1,4736	-7,0730	-34,8317	22,02	6,80
Rua José de Oliveira	Aeroclube	-71,38	2,2697	-7,0771	-34,8407	15,92	5,80
Av. Tancredo Neves	Ipês	-68,09	3,6266	-7,0996	-34,8603	14,48	2,50
Av. Ayrton Senna	Roger	-65,21	3,0457	-7,1143	-34,8883	22,41	1,43
Av. Epitácio Pessoa	Tambia	-44,05	3,9108	-7,1197	-34,8654	58,31	1,19
Busto de Tamandaré	Tambaú	-93,92	0,8558	-7,1188	-34,8237	14,51	5,74
Av. Ruy Carneiro	Brisamar	-77,10	0,9918	-7,1148	-34,8334	25,82	4,66
Av. Beira Rio	Tambauzinho	-68,68	1,4527	-7,1259	-34,8491	24,62	3,11
Av. Pedro II	Torre	-57,28	4,0649	-7,1277	-34,8663	28,95	1,63
Av. Castelo Branco	Castelo Branco	-63,18	1,6589	-7,1292	-34,8386	28,95	4,32
Rua João Cyrílio	Portal do Sol	-93,14	1,0354	-7,1450	-34,8130	9,58	7,61
Av. H. Souto Maior	Mangabeira	-93,16	0,5104	-7,1604	-34,8146	29,45	8,32
R. Ban. Sérgio Guerra	Bancários	-75,08	2,3904	-7,1492	-34,8419	50,04	5,20
R. Com. Alfredo Ferreira	Mangabeira	-72,18	3,3525	-7,1755	-34,8443	39,06	8,40
R. Pres. Raniei Mazzilli	Cristo	-72,12	2,6231	-7,1585	-34,8721	54,17	4,68
PB-008 (km 5)	Costa do Sol	-92,84	1,3839	-7,1970	-34,8077	23,19	11,65
BR-230 (km 25)	João Paulo II	-72,57	1,9294	-7,1694	-34,8773	54,98	5,87
Rua Floriano Peixoto	Valentina	-62,06	1,2159	-7,1956	-34,8538	40,71	9,09
Av. Dr. Valter Berialian	Distrito Industrial	-69,34	1,3848	-7,1841	-34,9104	48,73	8,43
Praia do Sol	B. de Gramame	-95,73	0,2759	-7,2164	-34,8064	19,08	13,44

Tabela 3 – Parâmetros de alguns pontos medidos.

Os parâmetros apresentados na Tabela 3 são, respectivamente, a localidade do ponto, o bairro em que ele se encontra, o desvio padrão das medições, as coordenadas geográficas, altitude (elevação acima do nível do mar) e a distância do ponto de medição

ao transmissor. Por intermédio da análise dessas medidas, observa-se alguns locais onde a recepção do sinal é insatisfatória; em locais distantes da antena transmissora, é evidente o baixo valor de potência recebido. O desvio padrão das medidas também não foi tão alto; o valor máximo (não representado na Tabela 3) foi de 7,9126 dB. Isso se deve ao fato de que o tempo para cada medição (100 medições e então a média delas) foi em torno de 2 segundos, o que, dependendo do local do ponto, era suficiente para se variar o nível de sinal. Para se ter uma melhor compreensão dos níveis de recepção das localidades, foi organizado um mapa com os pontos medidos nas rotas, indicando faixas de recepção. Nesse mapa, os valores limites (em dBm) estão um pouco discrepantes do recomendado pela NBR15604, para que os valores ficassem arredondados. Isto porque uma recepção a -80 dBm ainda é tolerável. O resultado está ilustrado na Figura 32.

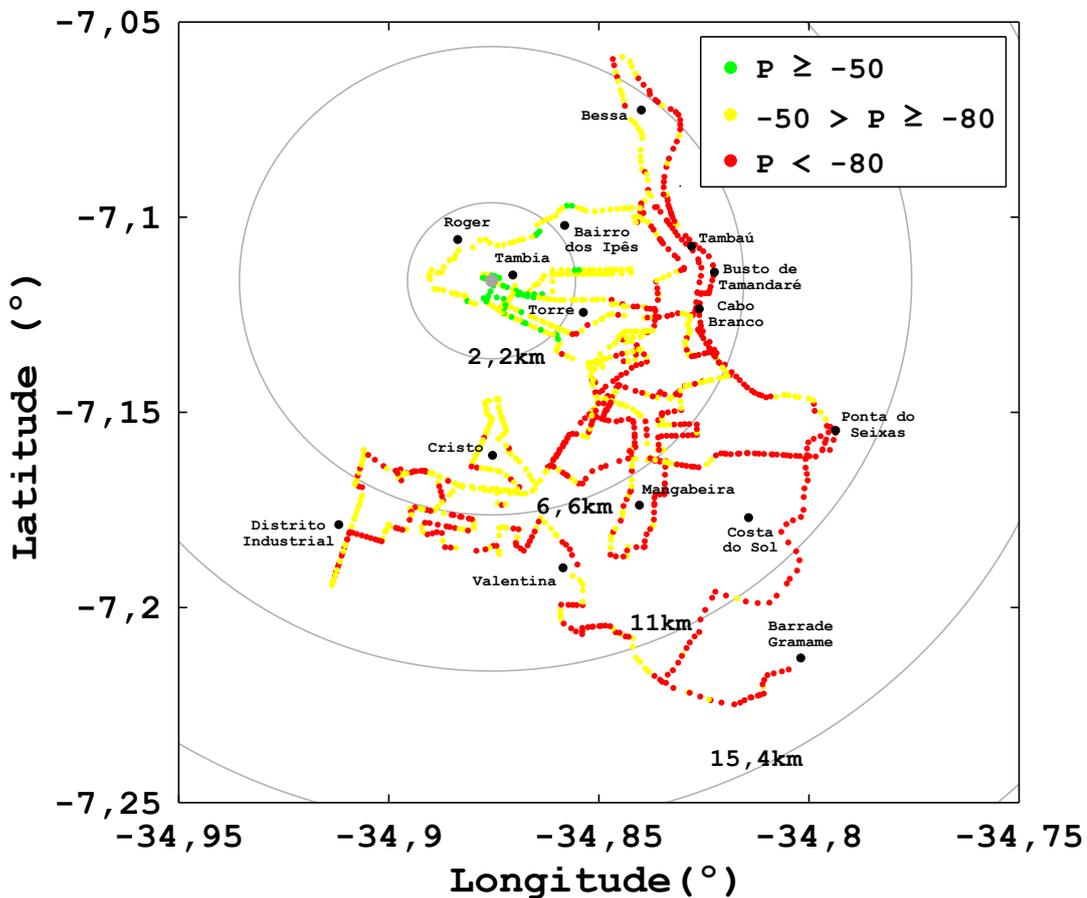


Figura 32 – Resultado das medições para João Pessoa (P em dBm).

Analisando a Figura 32 foi observado que em áreas distantes do transmissor os níveis de sinal estão abaixo dos indicados pela NBR15604 (que normatiza que o nível do sinal recebido deve estar entre -20 dBm e -77 dBm)(ABNT, 2007). Esses pontos estão representados em vermelho. Isso se deve principalmente a distância dos pontos para o transmissor, mas também a uma concentração de árvores, para os bairros da parte sudeste e leste da cidade (Costa do Sol, Paratibe, Ponta do Seixas e outros), e prédios, para os

bairros da orla da cidade (Bessa, Tambaú, Cabo Branco e outros). Os pontos que possuem um nível de recepção dentro da norma estão representados em verde e amarelo. Esses pontos estão localizados em bairros mais próximos ao transmissor (Tambia, Roger, Bairro dos Ipês, por exemplo), e também em bairros com uma menor quantidade de prédios elevados (Torre, Cristo). Vale ressaltar que, como as medições foram conduzidas a 2,1 m do chão, o nível de sinal seria diferente para antenas localizadas a uma altura maior, como por exemplo, antenas coletivas de prédios. Esses valores de potência indicam quais localidades sofrem interferência de prédios e vegetação, além da influência da distância a que estão da antena transmissora.

A antena utilizada na coleta das informações é uma log-periódica, portanto, diretiva. Embora ela consiga captar o sinal em todas as direções de forma satisfatória, o diagrama de radiação da Figura 26 mostra que ela pode ter um ganho maior, se posicionada na direção do transmissor. Como as medidas foram conduzidas com a antena em várias direções, assumiu-se então que as medidas receberiam um ganho de 5 dB, para se verificar o quanto os níveis de recepção poderiam melhorar. A Figura 33 ilustra o resultado.

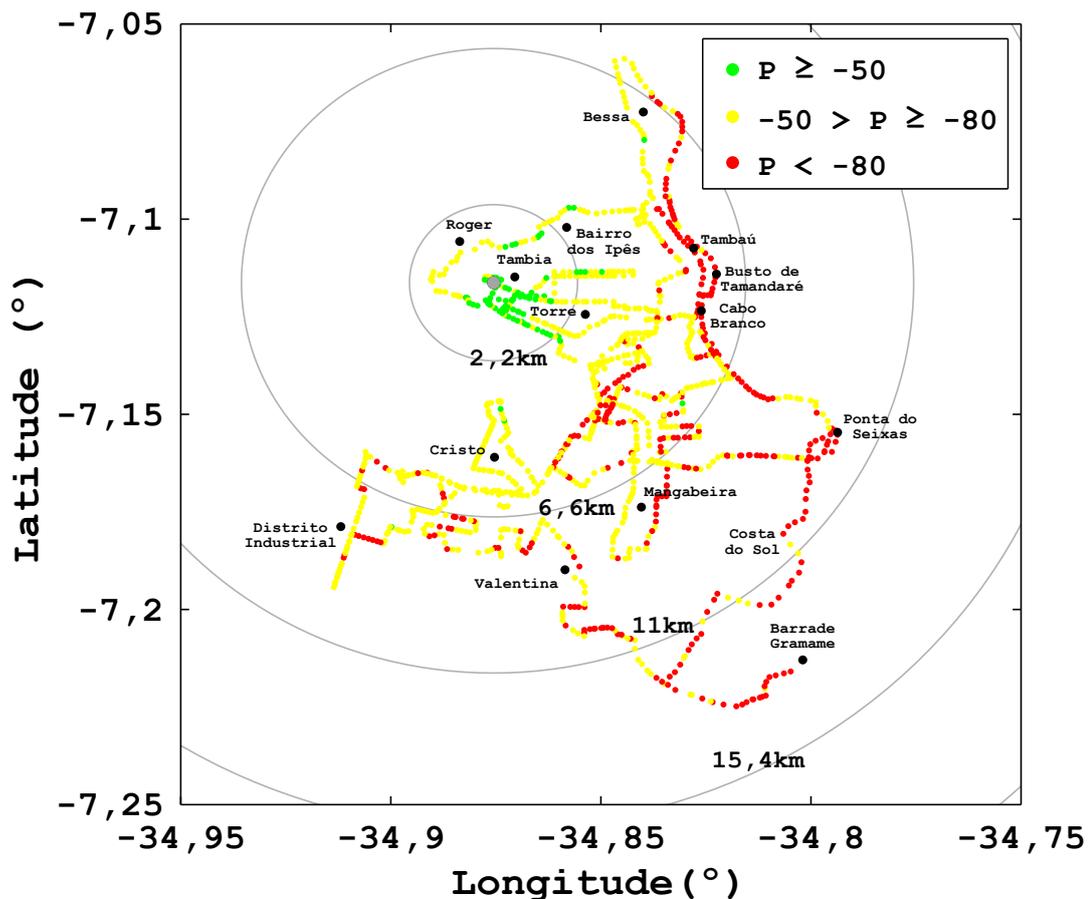


Figura 33 – Resultado das medições para João Pessoa (adicionando-se um ganho de 5 dB, e com P em dBm).

Com a correção feita, boa parte da cidade ficou com os níveis de sinal dentro do

intervalo satisfatório, à exceção dos pontos na orla da cidade e pontos mais distantes. Alguns pontos com nível de sinal alto estão entre pontos com níveis baixos (Distrito industrial, Costa do Sol); isso pode ser devido aos locais em que as medições foram conduzidas. Alguns desses pontos estavam localizados em zonas de sombra circunstanciais (um prédio isolado, uma zona com elevação baixa), fato que era observado a partir da variação rápida entre medidas muito próximas. O fator elevação também influencia bastante, principalmente nas zonas do litoral, o que pode ser observados nas duas figuras apresentadas.

5.2 Modelo de Propagação em Espaço Livre

A aplicação do modelo de propagação em espaço livre não considera nenhum parâmetro além da frequência da portadora e a distância para o transmissor. Logo, os valores de potência fogem totalmente à realidade da cidade. Apenas para fins de comparação esse modelo foi estudado, pois ele serve como base para os outros modelos. O mapa de João Pessoa com os valores de potência obtidos após a aplicação deste modelo está mostrado na Figura 34.

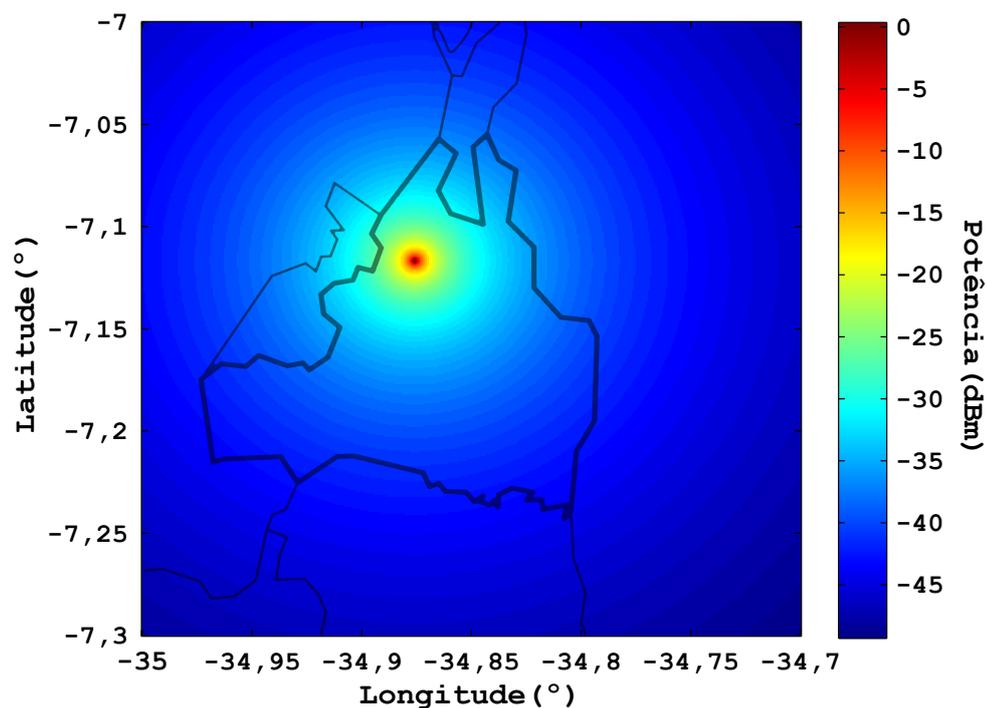


Figura 34 – Resultado da aplicação do modelo de espaço livre para João Pessoa.

5.3 Modelo de Propagação Log-Distância

O modelo de propagação log-distância possui uma vantagem em relação ao modelo de espaço livre: é possível utilizar como parâmetro uma medida real (a perda a uma

distância d_0 do transmissor). A perda foi assumida para 100 m, e foi medida como sendo 90 dB. Na Figura 35 está o resultado da aplicação do modelo (desconsiderar pontos abaixo de 100 m).

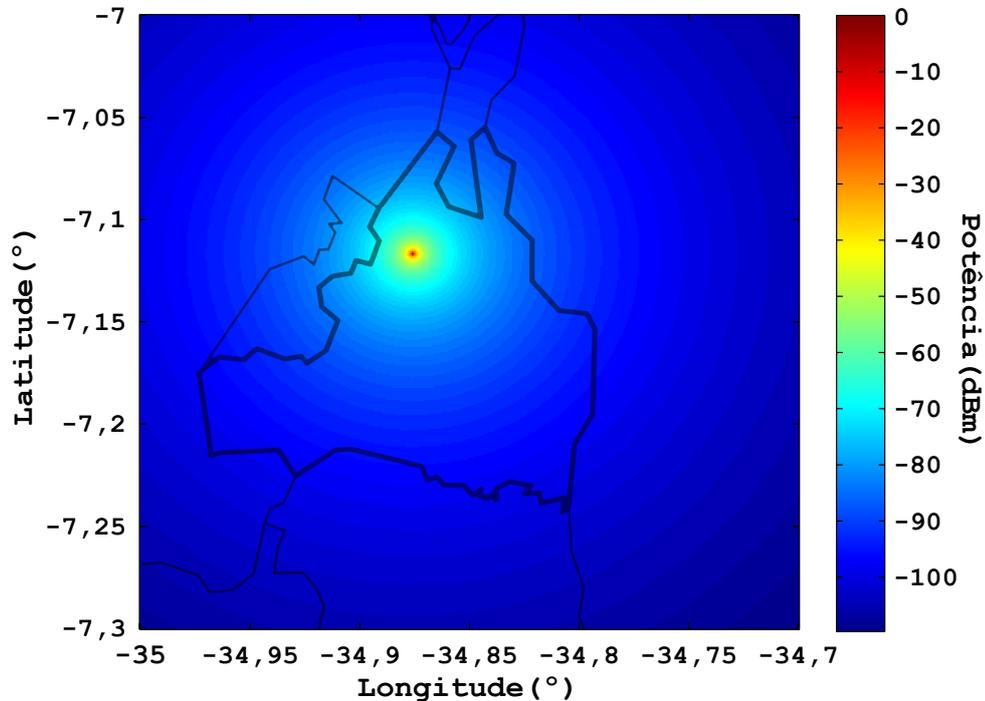


Figura 35 – Resultado da aplicação do modelo log-distância para João Pessoa.

Embora o modelo de log-distância não considere a elevação do transmissor, os valores de potência fornecidos por ele são bem satisfatórios, condizentes com a realidade. Isso se deve a existência de um fator de correção para o tipo de ambiente em que a transmissão ocorre, nesse caso uma área urbana. Assim como o modelo de espaço livre, fica visível que as áreas mais próximas do transmissor possuem um nível de sinal melhor que aquelas mais distantes.

5.4 Modelo de Okumura-Hata

Assim como os dois modelos estudados anteriormente, o modelo de Okumura-Hata apresenta uma resposta logarítmica com relação à distância entre antena transmissora e a receptora. O grande diferencial desse modelo é a inclusão de dois parâmetros importantes: a altura do transmissor e a do receptor. Apesar de mais diversificado, os níveis de potência encontrados com a aplicação do modelo seguem um padrão radial. A Figura 36 mostra a aplicação do modelo para a cidade de João Pessoa.

Para uma altura de 2,1m, os valores de potência obtidos com o Okumura-Hata estão um pouco maiores que o modelo de log-distância, mesmo considerando o pior dos

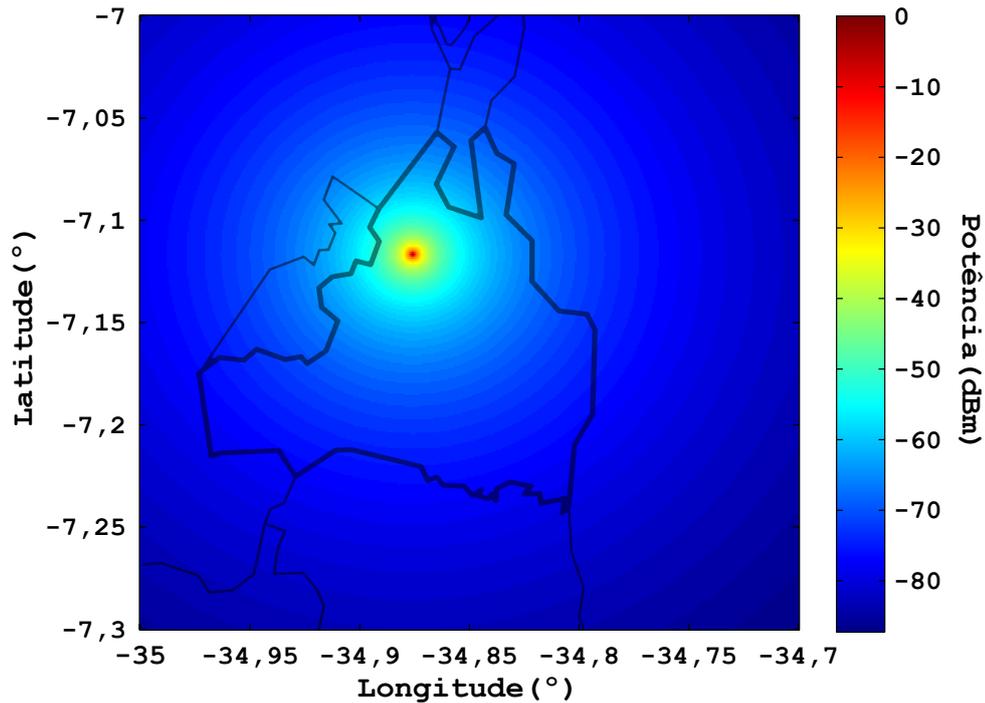


Figura 36 – Resultado da aplicação do modelo de Okumura-Hata para João Pessoa.

casos para o Hata. Isso ocorre devido ao fato de que a atenuação do modelo de log-distância é baseada em uma medida real de atenuação, tornando sua estimativa próxima dos valores reais. Como o modelo de Okumura-Hata tem como parâmetro a altura do receptor, e para se levar em conta a altitude deste e não somente sua altura em relação ao solo, a altura do receptor foi considerada a soma das duas. O resultado pode ser conferido na Figura 37.

Observa-se que a adição da altitude à altura do receptor diminui a atenuação total (ocorre um aumento da potência do ponto). Como previsto, a altitude influencia bastante no cálculo da atenuação com o modelo, tornando-o mais versátil para os diferentes tipos de terreno.

5.5 Modelo Proposto de RNA

Após a aplicação dos modelos de propagação, a rede neural foi treinada com os resultados dos modelos de Okumura-Hata (modificado), os pontos medidos para toda João Pessoa e os pontos medidos para o bairro os Bancários. Os erros absoluto e percentual máximos de cada um desses treinamentos estão na Tabela 4. Os parâmetros adotados para a rede neural são indicados na Seção 4.5.

Os valores dos erros mostram o desempenho de cada rede para cada conjunto de dados. A rede treinada com os dados do modelo de Okumura apresentou um erro bem pequeno; isso porque a quantidade de informações apresentadas para treinamento (ainda

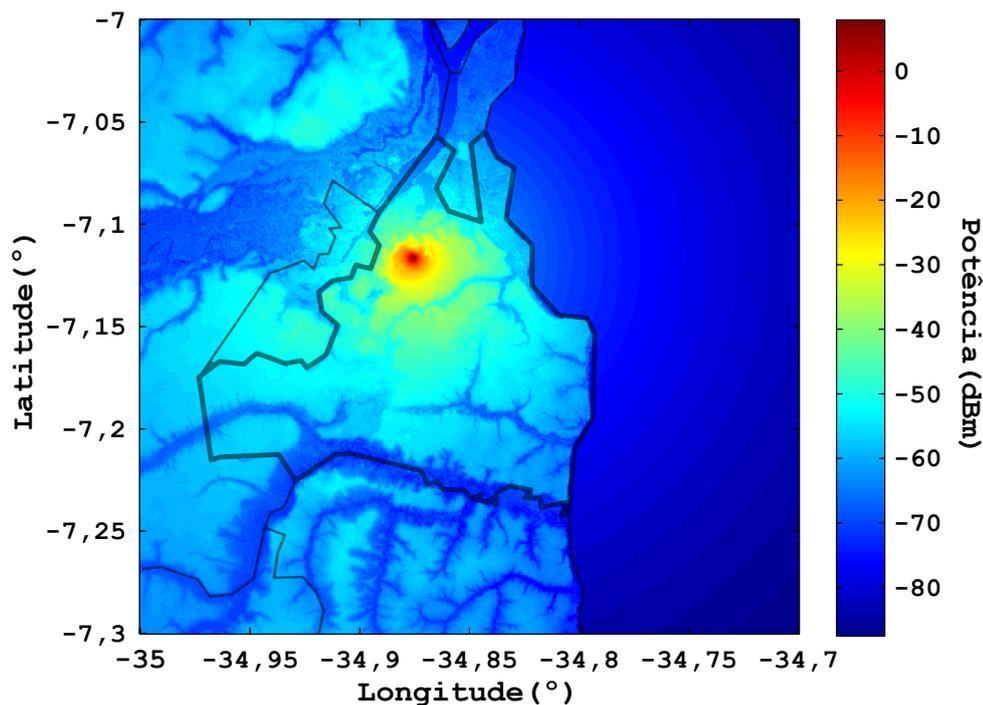


Figura 37 – Resultado da aplicação do modelo de Okumura-Hata (modificado) para João Pessoa.

Conjunto de dados	Erro abs. max. (dB)	Erro perc. max.(%)
Okumura-Hata(mod)	1,4488	2,23
Pontos João Pessoa	25,2251	75,91
Pontos Bancários	5,9430	6,93

Tabela 4 – Erros para cada um dos treinamentos.

que 70% delas) era grande, em torno de 90 mil pontos. Essa quantidade tornou a rede capaz reconhecer os padrões entre as entradas e as saídas apresentadas a ela. Quanto aos dados relacionados às medições na cidade de João Pessoa, nota-se que 1180 pontos para uma área vasta não são suficientes para se obter uma resposta satisfatória, ou seja, a densidade de pontos é pequena em relação à área estudada. O erro absoluto é relativamente grande, porém, maior ainda o erro percentual máximo, de mais de 75%, o que torna inviável a sua aplicação para uma estimativa de valores de potência. Quanto aos dados do bairro dos Bancários, os valores de erro se mantiveram baixos, comparados com os valores absolutos. Isso porque a quantidade de medições por área (162 pontos) foi bem maior que as conduzidas para o restante da cidade. Para efeitos de visualização, 100 pontos foram tomados dos resultados das redes neurais (para os dois primeiros casos) e comparados com os valores reais. O resultado está mostrado nas Figs. 38 e 39, respectivamente.

Analisando as Figura 38 e 39, fica visível o quanto o primeiro treinamento foi mais eficaz, pois as duas curvas estão praticamente sobrepostas. O segundo treinamento gerou respostas próximas para alguns valores, mas houve muita variação entre a resposta da rede

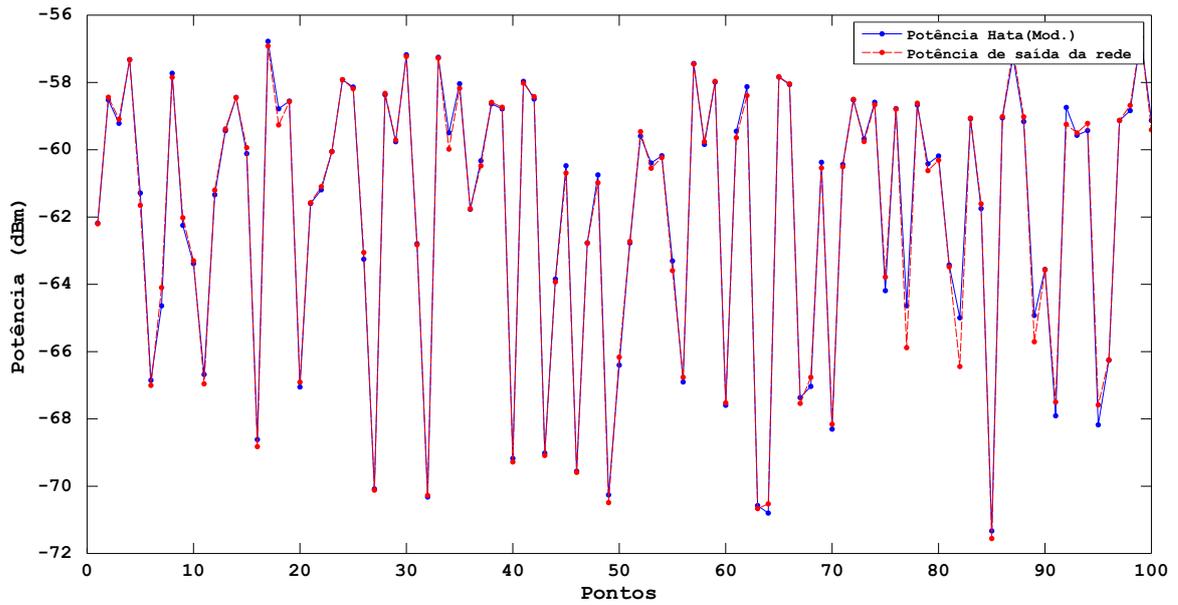


Figura 38 – Valores de potência de 100 pontos para a rede neural treinada com o modelo de Okumura-Hata (modificado).

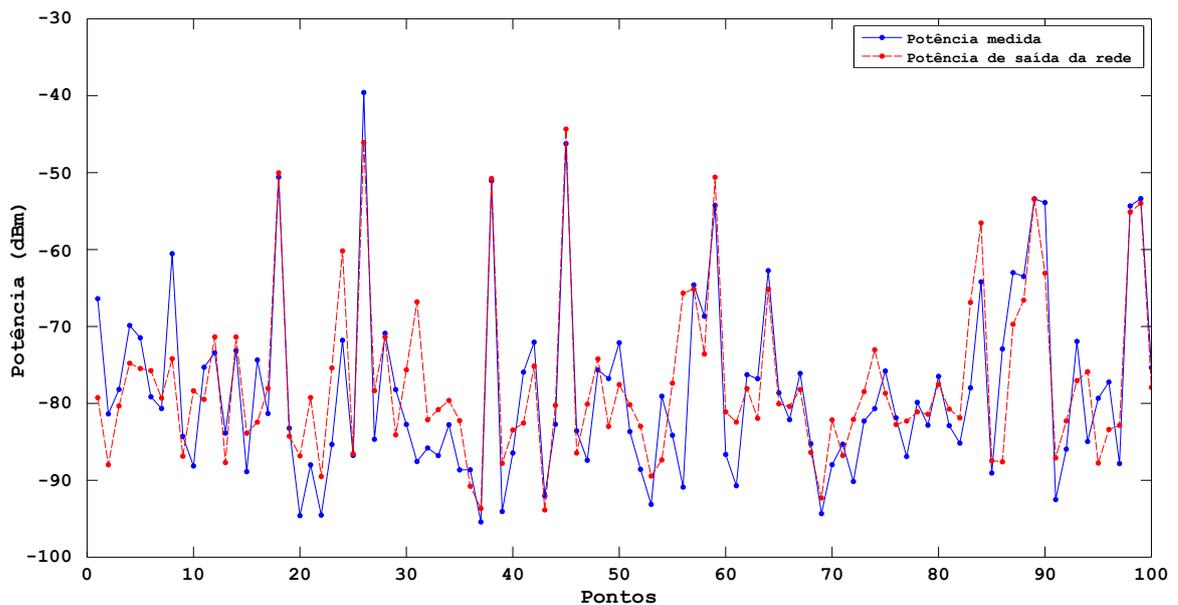


Figura 39 – Valores de potência de 100 pontos para a rede neural treinada com as medições pela cidade.

e os valores reais. As duas análises mostram a diferença entre utilização de quantidades distintas de pontos para o treinamento da rede neural. Para o terceiro treinamento, os valores de potência estão expressos na Tabela 5. Um fator que também influencia no resultado é a faixa de valores de potência para o bairro dos Bancários, que é menor em relação à cidade completa. Para a complexidade da modelo utilizado essa faixa menor é um fator que ameniza o erro absoluto. A análise final de todos esses dados leva à constatação

de que para uma maior quantidade de dados apresentados à rede, uma melhor resposta será apresentada por ela.

Valores medidos (dBm)	Valores da RNA (dBm)	Valores medidos (dBm)	Valores da RNA (dBm)
-77,41	-82,61	-81,61	-80,42
-85,68	-79,74	-77,61	-76,74
-80,56	-79,52	-77,87	-79,26
-76,64	-80,08	-80,66	-78,56
-82,10	-81,17	-82,55	-78,54
-86,31	-82,77	-87,69	-83,55
-82,81	-79,75	-89,96	-85,44
-74,00	-74,71	-84,69	-80,37

Tabela 5 – Comparação entre os valores medidos e os valores fornecidos pela rede neural.

5.6 Comparação e Validação dos Resultados

Após a avaliação individual de cada um dos modelos e das medições, foi feita também uma comparação entre eles. Procedeu-se assim para que fossem validados ou não os modelos estudados. A Figura 40 mostra a comparação de todos os modelos com os pontos medidos na cidade. Foram tomadas as coordenadas de cada ponto e aplicadas em cada modelo. A mesma comparação também foi feita para o bairro dos Bancários. (Figura 41)

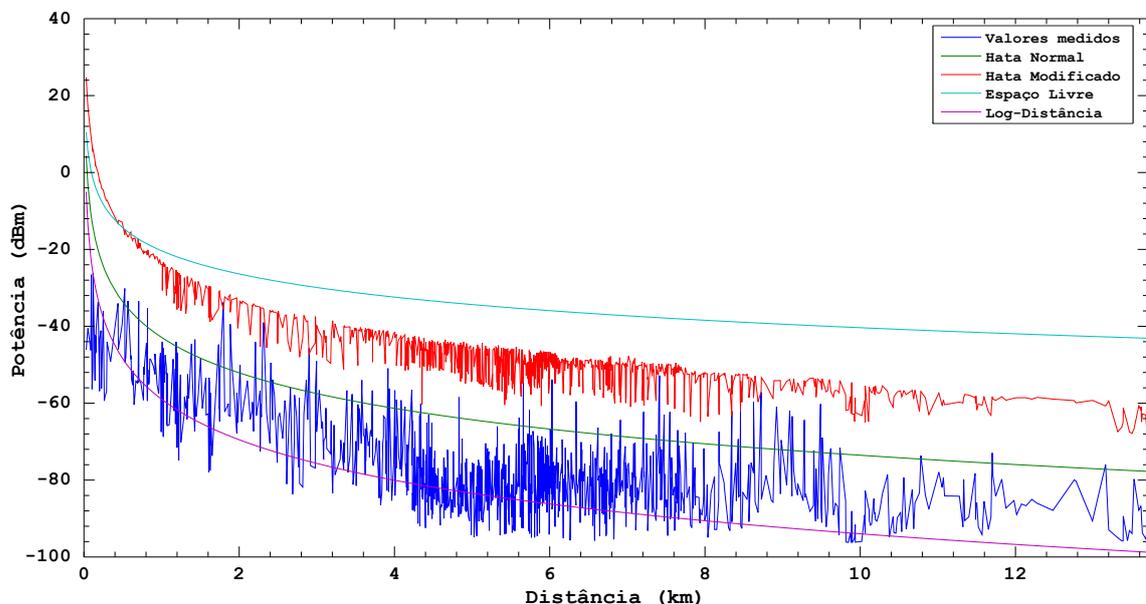


Figura 40 – Comparação entre os modelos de propagação e os valores das medições em função da distância do transmissor.

Analisando o gráfico da Figura 40, percebe-se que dos modelos estudados os que mais se aproximam dos valores das medições são o de Okumura-Hata e o log-distância. O

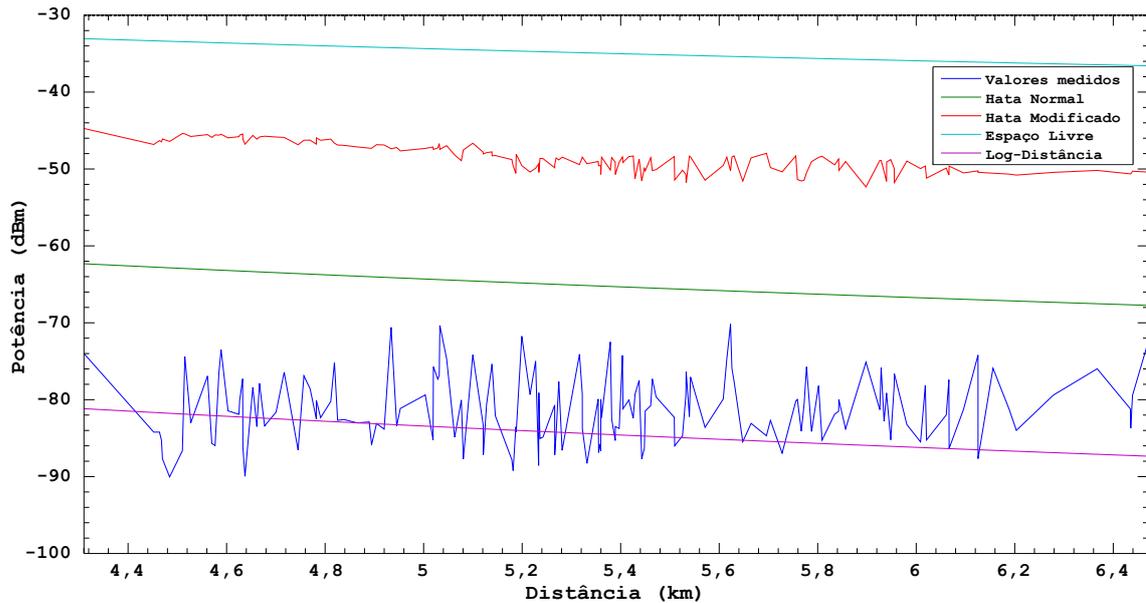


Figura 41 – Comparação entre os modelos de propagação e os valores das medições em função da distância do transmissor (Bancários).

modelo de Hata modificado, embora considere a variação do terreno, não apresentou valores de potência próximos aos valores medidos. O resultado pode ser melhorado modificando ainda mais o modelo, adicionando-se um valor de perda de referência, como no modelo log-distância, por exemplo. O gráfico também ilustra o grau de variação das potências medidas para a cidade, embora na média ela possua um comportamento logarítmico. Erros nas medições e o próprio aparato usado nelas podem ser indicados como fontes dessas variações, além das anteriormente mencionadas. A mesma conclusão a que se chegou com a análise da Figura 40 pode ser aplicada para o caso dos Bancários (Figura 41), mas com ênfase na aplicação do modelo de log-distância. Ele foi o que mais se aproximou em ambas as comparações, devido à utilização de uma medição real na sua aplicação. Outra característica notável é a faixa de valores de potência para o bairro dos bancários, que é menor que a faixa para a cidade completa. Assim, o modelo de log-distância não apresenta uma diferença muito grande dos valores medidos.

Conclusão

Este trabalho apresentou resultados de medições de intensidade de sinal de TV Digital de uma emissora, para a cidade de João Pessoa, com ênfase no Bairro dos Bancários. Foram apresentados também resultados da aplicação de modelos teóricos de propagação na estimação da atenuação do sinal. Por fim, foram aplicados algoritmos com Redes Neurais Artificiais para que fossem estimados os níveis de potência do sinal de TV Digital para a cidade de João Pessoa e o bairro dos Bancários.

A análise das medições conduzidas levou a uma identificação de pontos na cidade em que a recepção do sinal de TVD é prejudicada, seja pela concentração de prédios, pela vegetação ou distância do transmissor. Para que seja melhorada essa recepção, podem ser utilizadas antenas coletivas para prédios, ou antenas com uma diretividade maior, apropriadas para a recepção de sinais em UHF. Vale ressaltar também que os valores de potência medidos apresentam uma incerteza adicional, uma vez que as condições em que as medidas foram tomadas não estavam perfeitamente de acordo com as normas de medição padrão.

Com a aplicação dos modelos de propagação chegou-se à conclusão de que os modelos que mais se aproximavam da realidade da cidade foram os de Okumura-Hata e o de log-distância. Os valores dos modelos em espaço livre e do Hata modificado não podem ser usados em uma estimação real, embora o último considere a elevação do ponto de recepção.

Por fim, o modelo de rede neural proposto foi treinado para três casos diferentes, com uma variação na quantidade de pontos e na área coberta por eles. No caso da rede treinada com os dados obtidos através do Hata modificado, o resultado foi satisfatório, uma vez que o erro percentual máximo entre os valores comparados foi de pouco mais de 2%. Para o caso das medições em toda a cidade de João Pessoa o erro percentual foi alto, acima de 75% (devido ao fato dela ser treinada com poucos pontos). E a rede treinada com os dados dos Bancários mostrou um bom resultado, com quase 7%, o que leva à conclusão de que o primeiro e o último caso citados podem ser utilizados para estimar o valor de potência em suas áreas de cobertura.

O trabalho trouxe contribuições, como a geração de uma interface que torna mais fácil o manuseio do analisador de espectro, além de ilustrar as zonas da cidade em que a recepção do sinal de TVD não é satisfatória. Essa informação é importante para as emissoras da cidade de João Pessoa, pois se concentram em uma área bem próxima e partilham dos mesmos problemas com o canal de transmissão.

A partir dessas conclusões, como trabalhos futuros podem ser conduzidas medi-

ções mais apropriadas, com uma quantidade maior de pontos, para que sejam evitadas discrepâncias nos testes da RNA. O trabalho realizado abre espaço para medições com outros tipos de antena (principalmente omnidirecionais) e também medições subjetivas de qualidade de sinal utilizando aparelhos de TV. Pode ser desenvolvido também um modelo matemático, ou estudo, que se aplique ao ambiente da cidade de João Pessoa, levando em conta a elevação, como também a presença de prédios e a altura destes, a presença de vegetação, o horário da medição, entre outros parâmetros.

Referências

- ABNT. *Televisão digital terrestre - Receptores*. [S.l.], 2007. NBR15604. Citado na página 51.
- AGILENT. *N9340B Handheld Spectrum Analyzer*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7847EN.pdf>>. Citado na página 44.
- ALENCAR, M. S. *Digital Television Systems*. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 14, 16, 17 e 20.
- ATSC. *Digital Television System*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.atsc.org/cms/standards/a53/A53-Part-1-2013.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- BENTON. *The Origins and Future Prospects of Digital Television*. 2015. Disponível em: <https://www.benton.org/initiatives/obligations/charting_the_digital_broadcasting_future/sec1>. Acesso em: Fevereiro de 2015. Citado na página 13.
- CARVALHO, F. B. S. de. *Aplicação de Transmissão de Dados via Rede Elétrica para o Canal de Retorno em Televisão Digital*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006. Citado na página 17.
- DTV. *DTV Status*. 2014. Disponível em: <<http://www.dtvstatus.net/map/map.html>>. Acesso em: Outubro de 2014. Citado na página 18.
- EBU. *Choice of HDTV Compression Algorithm*. [S.l.], 2014. EBU R 124. Citado na página 16.
- HALLIDAY; RESNICK. *Fundamentals of Physics*. 10. ed. [S.l.]: Wiley, 2014. Citado na página 22.
- HAYKIN, S. *Neural Networks and Learning Machines*. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 33, 38, 39 e 40.
- HUMERFELT, S. *Earth According to WGS84*. 2014. Disponível em: <http://home.online.no/~sigurdhu/Grid_1deg.htm>. Acesso em: Outubro de 2014. Citado na página 41.
- ITU. *Guidelines and Techniques for the Evaluation of Digital Terrestrial Television Broadcasting Systems Including Assessment of Their Coverage Areas*. [S.l.], 2008. BT.2035-2. Citado na página 47.
- MARINHA DO BRASIL. *Navegação Eletrônica e em Condições Especiais*. [S.l.], 2000. III. Citado na página 23.
- POOLE, I. *Antennas, Aerials, and Propagation*. 2014. Disponível em: <<http://www.radio-electronics.com/info/antennas/>>. Acesso em: Outubro de 2014. Citado na página 23.
- POOLE, I. *Radio Signal Path Loss*. 2014. Disponível em: <<http://www.radio-electronics.com/info/propagation/path-loss/rf-signal-loss-tutorial.php>>. Acesso em: Setembro de 2014. Citado na página 26.

- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. ed. [S.l.]: Pearson Education Inc., 2002. Citado 6 vezes nas páginas 25, 26, 28, 29, 30 e 31.
- ROHDE-SCHWARZ. *DVB-T2: Technical Overview*. [S.l.], 2010. Disponível em: <http://www.rohde-schwarz.de/file_19456/DVBT-T2_po_en_A1_unfolded.pdf>. Citado na página 19.
- SWAMY, M. N. S.; DU, K.-L. *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 31.
- TAKAHASHI, Y. *Structure of ISDB-T system*. [S.l.]: ISDB-T technical seminar in Brazil, 2007. Citado na página 20.
- TELECO. *Desligamento da TV Analógica*. 2015. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tvdigital_desligamento.asp>. Acesso em: Fevereiro de 2015. Citado na página 21.
- USGS. 2014. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: Outubro de 2014. Citado na página 41.

Anexos

ANEXO A – Programa de Leitura de Dados DTED e Aplicação dos Modelos

Programa que lê os dados em formato DTED e gera as respostas de cada modelo de propagação.

```

freq = 501.25; % Frequencia em MHz do transmissor
ptx = 10*log10(4016.195*1e3); % Potencia em dBm do transmissor
zr = 2.1; % Altura padrao do receptor
vluz = 299792458; % Velocidade da luz
lambda = vluz/(freq*1e6); % Comprimento de onda da portadora
% Baixar o arquivo com extensao DTED1 e realizar a leitura
% data = dados de elevacao
% latgrid = valores de latitude
% longrid = valores de longitude
[data, latgrid, longrid] = mapreader2();
% Ajustar os valores de latitude e longitude
latgrid = latgrid-16;
longrid = longrid-70;
% Diminuir a quantidade de pontos apenas para os de interesse
latgrid = latgrid(841:end);
longrid = longrid(1:end-840);
data = data(841:end,1:end-840);

% Criar uma matriz de estruturas com as cordenadas de latitude, longitude,
% elevacao, potencia espaco livre, log-distancia, hata normal e modificado
a = struct('x',{0},'y',{0},'z',{0},'pe',{0},...
    'pl',{0},'phn',{0},'phm',{0},'d',{0});
points = repmat(a,length(latgrid));
[~, ix0] = min(abs(longrid+34.875553)); % Obter os indices das coord. do TX
[~, iy0] = min(abs(latgrid+7.116287));
points(iy0,ix0).x = longrid(ix0); % Dados do TX
points(iy0,ix0).y = latgrid(iy0);
points(iy0,ix0).z = data(iy0,ix0);
points(iy0,ix0).d = 0;
points(iy0,ix0).pe = 0;
points(iy0,ix0).pl = 0;
points(iy0,ix0).phn = 0;
points(iy0,ix0).phm = 0;
% zmed eh a altura media de uma area quadrada de
% 100 pontos ao redor do transmissor
zmed = 0;

```

```

for j = ix0-50:ix0+50
    for i = iy0-50:iy0+50
        zmed = data(i,j) + zmed;
    end
end
zmed = zmed/(i*j);

% Loop para calcular a atenuacao de cada ponto em relacao ao transmissor
for i = 1:length(latgrid)
    for j = 1:length(latgrid)
        if i==iy0 && j==ix0
            %caso o ponto seja igual ao do transmissor, nao fazer nada
        else
            if data(i,j) >1000
                data(i,j) = 0;
                % se a elevacao for um valor absurdo, coloca-lo para 0
            end
            % passagem dos dados para a estrutura
            points(i,j).z = data(i,j);
            points(i,j).x = longrid(j);
            points(i,j).y = latgrid(i);
            zrec = points(i,j).z + zr; %altura do receptor para o hm
            ztr = points(iy0,ix0).z+117-zmed; %altura do transmissor
            % Dist graus = 1_grau -> 60*1842m, logo x_m = 60*1842m*x_graus;
            % Calculo da distancia em linha reta por trigonometria
            xm = 60*1842*(abs(points(i,j).x - points(iy0,ix0).x));
            ym = 60*1842*(abs(points(i,j).y - points(iy0,ix0).y));
            dm = sqrt(xm^2+ym^2);
            dkm = dm/1000;
            points(i,j).d = dm;
            % Calculos das atenuacoes para cada modelo
            ahr = 3.2*(log10(11.75*zr))^2 - 4.97;
            atthn = 69.55 + 26.16*log10(freq) - 13.82*log10(ztr)...
                - ahr + (44.9 - 6.55*log10(ztr))*log10(dkm);
            ahr = 3.2*(log10(11.75*zrec))^2 - 4.97;
            atthm = 69.55 + 26.16*log10(freq) - 13.82*log10(ztr)...
                - ahr + (44.9 - 6.55*log10(ztr))*log10(dkm);
            atte = - 147.6 + 20*log10(dm) + 20*log10(freq*1e6);
            attl = 90+10*3.5*log10(dm/100);
            % Calculos das potencias para cada modelo
            points(i,j).phn = ptx - atthn;
            points(i,j).phm = ptx - atthm;
            points(i,j).pe = ptx - atte;
            points(i,j).pl = ptx - attl;
        end
    end
end
end

```

ANEXO B – Programa de Criação e Teste da Rede Neural (Padrão)

Programa que cria, configura e treina a RNA utilizada na estimação.

```

load('pontos.mat'); % Carregar os pontos
% pontos.all contem todos os pontos medidos, em forma de tabela
% [pot (dBm) pot (dBW) desvpad lat lon elev]

ind = randperm(length(pontos.all)); % Gerar indices aleatorios
setenta = ceil(0.9*length(ind)); % Gerar um limite para 70% dos pontos
% Separar os indices em indices de treinamento e teste
itrn = ind(1:setenta);
itst = ind(setenta+1:end);

% Usar os indices para separar em pontos de treinamento e teste
ctrn = pontos.all(itrn,4:6);
ptrn = pontos.all(itrn,1);
ctst = pontos.all(itst,4:6);
ptst = pontos.all(itst,1);

% Criacao da rede neural com 3 camadas escondidas com 50 neuronios cada
% e funcao de treinamento 'traingdx', entre outros parametros
net = feedforwardnet([50 50 50], 'traingdx');
net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.goal = 1;
net.trainParam.lr = 0.01;
net.trainParam.show = 25;

net = train(net,ctrn',ptrn'); % Funcao para treinamento da rede
pout = sim(net,ctst'); % Simulacao da rede
errabsmax = max(abs(ptst'-pout)); % Calculo do erro absoluto max
errpercentual = abs(ptst'-pout)./abs(ptst')*100; % Erro percentual max

```

ANEXO C – Funções de Conexão e Medição da Interface Gráfica

Funções de conexão com o analisador e medição através de comando SCPI.

```
% Funcao de conexao com o analisador
function con_Callback(hObject, eventdata, handles)

% Protocolo de comunicacao VISA
set = instrhwininfo('visa','agilent'); % Reconhecer o analisador conectado
hw = set.ObjectConstructorName{1};
handles.obj.analisador = eval(hw); % Criar um objeto do analisador

% Caso esteja aberta, fechar a conexao, caso nao, abri-la
fclose(handles.obj.analisador);
fopen(handles.obj.analisador);

% Comandos SCPI
% Setar a atenuacao para 0dB
fprintf(handles.obj.analisador,':SENSe:POWer:RF:ATTenuation 0');
% Setar o sweep time para 1s
fprintf(handles.obj.analisador,':SENSe:SWEep:TIME 1');
% Setar frequencia central igual a escolhida na interface
fprintf(handles.obj.analisador,[':SENSe:FREQ:CENT '...
    num2str(str2double(get(handles.fcent,'String')),'%4E')]);
% Setar span igual a escolhida na interface
fprintf(handles.obj.analisador,[':SENSe:FREQ:SPAN '...
    num2str(str2double(get(handles.fspan,'String')),'%4E')]);
% Caixa de mensagem para indicar uma conexao bem sucedida
msgbox('Conectado com sucesso','Conexao');

guidata(hObject,handles);

% Funcao que realiza as medicoes
function med_Callback(hObject, eventdata, handles)

% Setar o span automaticamente para 5MHz, para se pegar o espectro inteiro
fprintf(handles.obj.analisador,':SENSe:FREQ:SPAN 5.0E+06');
set(handles.fspan,'String','5e6');

temp = [];
for i=1:100
```

```
% Obter 100 medicoes de cada ponto, onde cada ponto ja eh medido
% 100 vezes no espectro e eh tirada uma media
fprintf(handles.obj.analisador, ':TRACe1:FORM REAL');
fprintf(handles.obj.analisador, ':TRACe1:DATA?;*WAI');
temp = [temp mean(fread(handles.obj.analisador,100,'float32'))];
flushoutput(handles.obj.analisador);
end
% Calculo do desvio padrao das 100 medicoes
devpad = std(temp);
% Conversao para dBW
resdb = (10.^(temp/10))*1e-3;
resdb = pow2db(resdb);

% Resultado, a media dos 100 pontos
res = mean(temp);
resdb = mean(resdb);

% Gerar um log com as medicoes, em txt
fdata = 'dd-mm-yyyy';
pfile = fopen([get(handles.caminho,'String') '\med' handles.str.nome...
    datestr(clock,fdata) '.txt'],'a+');
fhr = 'HH:MM:SS';
hora = datestr(clock,fhr);
fprintf(pfile, '%.2f%.12.2f%.12.4f    %s %s %s\r\n', res, resdb, devpad, ...
    hora(1:2), hora(4:5), hora(7:8));
fclose(pfile);

guidata(hObject,handles);
```