UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

A Utilização de Redes Neurais Artificiais na Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital

Douglas Dias da Silva

Orientador: Prof. Dr. Getúlio Antero de Deus Júnior

Goiânia
2009

Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás–UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **[ ] Dissertação** **[ ] Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):					
CPF:		E-mail:			
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? [ ]Sim [] Não					
Vínculo Empregatício do autor					
Agência de fomento:				Sigla:	
País:		UF:		CNPJ:	
Título:					
Palavras-chave:					
Título em outra língua:					
Palavras-chave em outra língua:					
Área de concentração:					
Data defesa: (**dd**/mm/aa)					
Programa de Pós-Graduação:					
Orientador(a):					
CPF:		E-mail:			
Co-orientador(a):					
CPF:		E-mail:			

3. Informações de acesso ao documento:
Liberação para disponibilização?[1] [ ] total [ ] parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:
[ ] Capítulos. Especifique: _____
[ ] Outras restrições: _____Gostaria que não fosse divulgado os anexos.

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.
O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Data: / / Assinatura do(a) autor(a)

[1] Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

©Copyright 2009
Douglas Dias da Silva

Douglas Dias da Silva

A Utilização de Redes Neurais Artificiais na Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.
Área de Concentração: Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. Dr. Getúlio Antero de Deus Júnior.

Goiânia
2009

Silva, Douglas Dias.
S586u A utilização de redes neurais artificiais na estimação da cobertura do sinal de televisão digital [manuscrito] / Douglas Dias da Silva. - 2009.
xv, 192 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Getúlio Antero de Deus Júnior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, 2009.

Bibliografia.
Inclui lista de figuras, Abreviaturas e tabelas.

1. Televisão digital 2. Redes Neurais Artificiais (RNA) 3. Telecomunicações I. Título.

CDU: 621.397.13

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação
Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação

FOLHA DE APROVAÇÃO

"A Utilização de Redes Neurais Artificiais na Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital"

DOUGLAS DIAS DA SILVA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Dr. Getúlio Antero de Deus Júnior, Orientador - EEEC/UFG

Prof. Dr. Jaime Portugheis - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito - EEEC/UFG

Goiânia, 12 de agosto de 2009

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos:

– ao professor doutor Getúlio Antero de Deus Júnior, pela orientação, dedicação, incentivo e paciência;

– à minha familia pela paciência e incentivo;

– à Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da UFG, nas pessoas dos professores que compõem o seu quadro docente e dos técnicos administrativos;

– à minha amiga Dinha pela ajuda prestada na realização das medições em campo;

– à todos os colegas do mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação da UFG;

– à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Professor Rodrigo Pinto Lemos;

– à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte oferecido.

Resumo

NESTE trabalho, são apresentadas informações sobre a intensidade de sinal obtidas em campo e em simulações para as recepções *one-seg* e *full-seg* na grande Goiânia. Os valores obtidos pelas medições foram utilizados para uma comparação entre os modelos de propagação presentes na literatura, com o objetivo de determinar a real condição do sinal de TV digital na região da grande Goiânia.

Foram apresentados os modelos de propagação encontrados na literatura e válidos para aplicação no sistema de transmissão digital. Os modelos estudados foram o modelo Espaço Livre, modelo Log-distância, o modelo Hata e o método ITU-R P.1546-1 com o objetivo de determinar a intensidade de sinal para a transmissão de televisão digital na cidade de Goiânia (RAPPAPORT, 1996) (UNION, 2003). Objetivando o desenvolvimento de uma ferramenta de estimação da intensidade de sinal, realizou-se estudos referentes à teoria de redes neurais e suas aplicações. Foram estudadas as arquiteturas Perceptron e Perceptron de Múltiplas Camadas, com ênfase na última arquitetura e no seu treinamento supervisionado através do algoritmo de retropropagação do erro (HAYKIN, 2001). O Sistema Brasileiro de Televisão Digital foi descrito através das normas de referências elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, detalhando seu sistema de transmissão e dispositivos de recepção (TÉCNICAS, 2008a) (TÉCNICAS, 2008h).

Medições em campos da intensidade de sinal para os modos de recepção *one-seg* e *full-seg* foram realizadas na região da grande Goiânia. Essas medições seguiram as sugestões apresentadas pelo Relatório ITU-R BT.2035-1 e utilizou um analisador de radiofrequência e um sistema de posicionamento global (do inglês: *Global Positioning System* - GPS). Com os dados obtidos nas medições, mapeou-se a situação da cobertura do sinal digital na cidade de Goiânia, que revelou um nível de intensidade inferior aos modelos estudados. Foi desenvolvida uma ferramenta para a

estimação da intensidade do sinal utilizando uma Rede Neural Artificial (RNA), sendo treinada com os dados obtidos das medições. A ferramenta foi utilizada para a obtenção da intensidade de sinal para diversos cenários propostos. A estimativa da intensidade de sinal para o cenário com concentração de árvores e ausência de visada direta mostrou-se mais próximo da realidade encontrada na cidade de Goiânia, consequência da grande concentração de árvores existente.

Abstract

THIS works presents information about signal intensity obtained on field and from simulations for one-seg and full-seg receptions, the city of Goiânia. The values obtained from measurements were used for a comparisson among propagation models that are presented in literature, and the goal is to determine the real condition of digital TV signal in the region of Goiânia.

The propagation models presented are available in literature and can be implemented in digital transmission system. The studied models were Free Space model, Log-Distance model, Hata model and ITU-R P.1546-1 method, and the objective was to determine the signal intensity of digital television transmission in the city of Goiânia (RAPPAPORT, 1996) (UNION, 2003). Focusing on the development of a tool for signal intensity estimation, some researches were done about neural networks theory and its applications. Perceptron and Multilayer Perceptron were the analised architectures, emphasyzing on the last one and on its supervisioned trainning through the backpropagation error algorithm (HAYKIN, 2001). The Brazilian Digital Television System was described by reference rules made by Associação Brasileira de Normas Técnicas, which has detailed its transmission system and reception devices (TÉCNICAS, 2008a) (TÉCNICAS, 2008h).

Measurements of signal intensity for one-seg and full-seg reception methods were made on field in the region of Goiânia. These measurements followed the sugestions presented by Report ITU-R BT. 2035-1 and it used a radiofrequency analyzer and a Global Positioning System (GPS). With the obtained data, the digital signal covering situation in the city of Goiânia was mapped, which revealed a lower intensity level to the studied models. A tool for signal intensity estimation was developed using Artificial Neural Networks, which was trained with the dada obtained from the performed measurements. This tool was used to obtain the

signal intensity for several proposed scenarios. The signal intensity estimation for the scenario that has tree density and target absence distinguished as the one that was closest to the reality of Goiânia, which is a consequence of high density of trees.

Sumário

Lista de Abreviaturas p. 12

Lista de Figuras p. 15

Lista de Tabelas p. 22

1 Introdução p. 25

1.1 Organização da Dissertação . . . . . p. 27

2 Preliminares Teóricas p. 29

2.1 Modulação Digital . . . . . p. 29

2.1.1 Chaveamento em Quadratura de Fase (QPSK) . . . . . p. 30

2.1.2 Chaveamento em Quadratura Diferencial (DQPSK) . . . . p. 31

2.1.3 Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM) . . . . . p. 32

2.2 Sistema de Transmissão Digital . . . . . p. 34

2.3 Modelos de Propagação . . . . . p. 38

2.3.1 Recomendação ITU-R P.1546-1 . . . . . p. 38

2.3.2 Modelo de Propagação em Espaço Livre . . . . . p. 44

2.3.3 Modelo de Perda de Propagação Log-Distância . . . . . p. 46

2.3.4 Modelo de Propagação Hata . . . . . p. 47

2.3.5 Difração . . . . . p. 50
2.4 Sistema de Coordenadas e de Informações Geográficas . . . . . p. 52

3 Redes Neurais Artificiais p. 55
3.1 Redes Biológica e Artificial . . . . . p. 55
3.2 Tipos de Aprendizados . . . . . p. 57
3.3 Função de Ativação . . . . . p. 59
3.4 Perceptron . . . . . p. 61
3.4.1 Teorema de Convergência do Perceptron . . . . . p. 63
3.5 Perceptron de Múltiplas Camadas . . . . . p. 65
3.5.1 Algoritmo de Retropropagação do Erro . . . . . p. 66
3.5.2 Critérios de Parada . . . . . p. 71
3.5.3 Inicialização dos Pesos . . . . . p. 71
3.5.4 Validação Cruzada . . . . . p. 72
3.5.5 Aproximação de Funções . . . . . p. 73
3.5.6 Validação da RNA Utilizada neste Trabalho . . . . . p. 77

4 Sistema ISDB-Tb p. 83
4.1 Sistema de Transmissão . . . . . p. 86
4.1.1 Processo de Transmissão . . . . . p. 87
4.1.1.1 Remultiplexador do Feixe de Transporte . . . . . p. 89
4.1.1.2 Codificação Externa . . . . . p. 90
4.1.1.3 Divisão do feixe de transporte em camada hierárquica . . . . . p. 91

4.1.1.4 Dispersor de Energia . . . . . p. 91
4.1.1.5 Ajuste de Atraso . . . . . p. 91
4.1.1.6 Entrelaçador de *byte* . . . . . p. 92
4.1.1.7 Codificação Interna . . . . . p. 92
4.1.1.8 Modulação . . . . . p. 93
4.1.1.9 Combinação de Camadas Hierárquicas . . . . . p. 93
4.1.1.10 Entrelaçador de Tempo . . . . . p. 95
4.1.1.11 Entrelaçamento em Frequência . . . . . p. 97
4.1.1.12 Estrutura de Quadro OFDM . . . . . p. 97
4.2 Receptores . . . . . p. 99
4.2.0.13 Especificações das unidades receptoras . . . . . p. 99

5 Proposta para Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital p. 108
5.1 Campanha de Medidas . . . . . p. 108
5.1.1 Equipamentos Utilizados . . . . . p. 109
5.1.1.1 Sistema de Posicionamento Global . . . . . p. 109
5.1.1.2 Analisador de Radiofrequência . . . . . p. 111
5.1.2 Escolha dos Sítios de Medições . . . . . p. 113
5.1.3 Medições . . . . . p. 116
5.2 Proposta da Arquitetura do Perceptron de Múltiplas Camadas para Estimação da Cobertura do Sinal . . . . . p. 119
5.2.1 Arquitetura . . . . . p. 120

5.2.2 Tratamento dos Dados . . . . . p. 122
5.2.3 Treinamento . . . . . p. 130
5.3 Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital . . . . . p. 139
5.3.1 Cenários . . . . . p. 139
5.3.2 Cobertura Estimada . . . . . p. 142

6 Conclusões p. 161
6.1 Trabalhos Futuros . . . . . p. 163

Anexo A – Valores da Intensidade de Sinal e Localização dos Sítios Utilizados na Campanha de Medidas p. 164

Apêndice A – Algoritmo para Aplicação da Recomendação ITU-R P.1546-1 p. 176

Apêndice B – Método Okumura-Hata p. 182

Apêndice C – Conversão das unidades dBμV/m em dBm p. 184

Referências p. 187

Lista de Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas,

ABNT/CEE - Comissão de Estudo Especial de Televisão Digital,

AC - "*Auxiliary Channel*",

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações,

CP - "*Continual Pilot*",

DQPSK - "*Differential Quadrature Phase-Shift Keying*" (Chaveamento em Quadratura de Fase Diferencial),

EQM - Erro quadrático médio,

GPS - "*Global Positioning System*" (Sistema de Posicionamento Global),

HCI - Altura do centro de irradiação da antena em relação a cota da base da torre,

HDTV - "*High-Definition Television*",

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,

IFFT - "*Inverse Fast Fourier Transformation*" (Transformada Rápida Inversa de Fourier),

IG - Intervalo de Guarda,

IRD - "*Integrated Receiver Decoder*" (Decodificador de recepção integrado,

ISDB-Tb - "*Integrated Services Digital Broadcasting Terestrial*" Serviço Integrado de Transmissão Digital Terrestre Brasileiro),

ITU - "*International Telecomunication Union*",

MLP - "*Perceptron Multilayer*" (Perceptron de Múltiplas Camadas),

MPEG2 - "*Moving Picture Experts Group*",

OFDM - "*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*",

PBFM - Plano Básico de Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada,

PBRTV - Plano Básico de Distribuição de Canais de Retransmissão de Televisão em VHF e UHF,

PBTV - Plano Básico de Distribuição de Frequências de Televisão em VHF e UHF,

PBTVA - Plano Básico de Distribuição de canais de Televisão Digital,

PBTVD - Plano Básico de Distribuição de Canais de TV Digital,

QAM - "*Quadrature Amplitude Modulation*" (Modulação de Amplitude em Quadratura),

QPSK - "*Quadrature Phase-Shift Keying*" (Chaveamento em Quadratura de Fase),

RNA - Rede Neural Artificial,

RS - Código *Reed-Solomon*,

SA - "*Spectrum Analyzer*" (Analisador de Espectro),

SBTVD - Fórum do Sistema Brasileiro de Tv Digital Terrestre,

SDTV - "*Standard-Definition Television*",

SI - Serviços de Informação,

SIGANATEL - Sistema de Informações Geográficas da Agência Nacional de Telecomunicações,

STB - "*Set-top Box*" (conversor digital),

TMCC - "*Transmission and Multiplexing Configuration Control*",

TS - "*Transport Stream*" (Feixe de Transporte),

TSP - "*Transport Stream Packet*",

UHF - "*Ultra High Frequency*",

VT - Videotape.

Lista de Figuras

1 Diagrama de Espaço do Sinal do Sistema QPSK Coerente. . . . . p. 32

2 Possíveis Caminhos de Comutação entre Fases no DQPSK. . . . . p. 33

3 Espaço de Sinal para a Modulação 64-QAM. . . . . p. 34

4 Espaço de Sinal para a Modulação 16-QAM. . . . . p. 35

5 Diagrama de Blocos do Sistema de Transmissão Digital. . . . . p. 36

6 Curvas de Intensidade de Campo para 1 kW e.r.p.. . . . . p. 41

7 Curvas de Intensidade de Campo Adquiridas Através do Método ITU-R P.1546-1 com Variabilidade de Tempo de 10% e 50% para uma Potência Irradiada de 1 kW e.r.p.. . . . . p. 42

8 Curvas de Intensidade de Campo Adquiridas Através do Método ITU-R P.1546-1 com Variabilidade de Tempo de 10% e 50% para uma Potência Irradiada de 21,116 kW e.r.p.. . . . . p. 43

9 Modelo de Propagação Espaço Livre para a Estação de Transmissão da Televisão Anhanguera na Cidade de Goiânia. . . . . p. 46

10 Modelo de Perda de Propagação Log-Distância para a Estação de Transmissão da Televisão Anhanguera na Cidade de Goiânia. . . . p. 48

11 Modelo de Propagação HATA para Grandes Cidades para a Estação de Transmissão da Televisão Anhanguera na Cidade de Goiânia. . . . . p. 50

12 Geometria de Difração. . . . . p. 51

13 *Layout* do Sistema Siganatel. . . . . p. 53

14 Neurônio Biológico. . . . . p. 56

15 Modelo de Neurônio Artificial. . . . . p. 56

16 Diagrama de Blocos da Aprendizagem Supervisionada. . . . . p. 58

17 Diagrama de Blocos da Aprendizagem Não Supervisionada. . . . . p. 59

18 Função de Ativação Sinal ou Função de *Heaviside*. . . . . p. 60

19 Função de Ativação Linear, com $a = 0{,}5$. . . . . p. 61

20 Função de Ativação Sigmoide, com $a = 5$. . . . . p. 62

21 Grafo de Fluxo de Sinal do Perceptron. . . . . p. 62

22 Classes de Padrões Linearmente Separáveis. . . . . p. 64

23 Classes de Padrões Não Linearmente Separáveis. . . . . p. 64

24 Exemplos de MLP. . . . . p. 66

25 Neurônio de Saída *j*. . . . . p. 67

26 Curvas de Aprendizagem. . . . . p. 73

27 Rede neural com uma camada escondida. . . . . p. 75

28 Aproximação de Função para o Modelo Espaço Livre. . . . . p. 79

29 Aproximação de Função para o Modelo Log-Distância. . . . . p. 80

30 Aproximação de Função para o Modelo Hata para Grandes Cidades. p. 82

31 Visão geral do sistema de transmissão. . . . . p. 86

32 Diagrama em Blocos da Codificação de Canal. . . . . p. 102

33 Exemplo de Feixe de Transporte Remultiplexado (Modo 1, Intervalo de Guarda 1/8). . . . . p. 103

34 Gerador do Polinômio da Sequência Pseudo-aleatória. . . . . p. 103

35 Circuito de codificação do código convolucional com profundidade k de 7 e taxa de codificação 1/2. . . . . p. 103

36 Configuração do combinador de camadas. . . . . p. 104

37 Configuração da Seção de Entrelaçamento no Tempo. . . . . p. 105

38 Configuração da Seção de Entrelaçamento em Frequência. . . . . p. 105

39 Configuração do Segmento OFDM para Modulação Diferencial. . p. 106

40 Configuração do Segmento OFDM para Modulação Diferencial (QPSK, 16QAM, 64QAM) no Modo 1. . . . . p. 106

41 Inserção do Intervalo de Guarda. . . . . p. 107

42 Configuração Básica do Receptor. . . . . p. 107

43 Método de Triangulação. . . . . p. 110

44 GARMIN - eTrex Vista HCx. . . . . p. 111

45 Analisador de Radiofrequência *FieldFox* N9912A, da Marca *Agilent Technologies*. . . . . p. 112

46 Antena retrátil RH799, da Marca *Diamond Antenna*. . . . . p. 113

47 Forma de Onda Obtida pelo Analisador de Espectro para Recepção Digital da TV Anhanguera no Ponto 79. . . . . p. 114

48 Sítios de Medições. . . . . p. 116

49 Sítios de medições efetivamente medidos. . . . . p. 118

50 Intensidade de sinal para os modelos de propagação e pontos medidos (dBm), no modo de recepção *one-seg*. . . . . p. 119

51 Intensidade de sinal para os modelos de propagação e pontos medidos (dBm), no modo de recepção *full-seg*. . . . . p. 120

52 Arquitetura da Rede Neural MLP proposta. . . . . p. 121

53 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *One-seg* com Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 124

54 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *one-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Prédios e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 125

55 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para Recepção *One-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Árvores e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 126

56 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *one-seg* sem Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 127

57 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *Full-seg* com Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 128

58 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *Full-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Prédios e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 129

59 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para Recepção *Full-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Árvores e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 130

60 Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *Full-seg* sem Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência. . . . . p. 131

61 Arquitetura da Rede Neural Obtida após o Treinamento para o Modo de Recepção *One-seg*. . . . . p. 135

62 Arquitetura da Rede Neural Obtida após o Treinamento para o Modo de Recepção *Full-seg*. . . . . p. 138

63 Mapa, Centrado na Antena Transmissora da TV Anhanguera, com os Valores de Relevo em metros. . . . . p. 140

64 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário A, com a Pior Condição de Recebimento. . . . . p. 143

65 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário A, com a Melhor Condição de Recebimento. . . . . p. 144

66 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário A, com Condição de Recebimento Neutra. . . . . p. 145

67 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário B, com a Pior Condição de Recebimento. . . . . p. 146

68 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário B, com a Melhor Condição de Recebimento. . . . . p. 147

69 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário B, com Condição de Recebimento Neutra. . . . . p. 148

70 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário C, com a Pior Condição de Recebimento. . . . . p. 149

71 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário C, com a Melhor Condição de Recebimento. . . . . p. 150

72 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário C, com Condição de Recebimento Neutra. . . . . p. 151

73 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário A, com a Pior Condição de Recebimento. . . . . p. 152

74 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário A, com a Melhor Condição de Recebimento. . . . . p. 153

75 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário A, com Condição de Recebimento Neutra. . . . . p. 154

76 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário B, com a Pior Condição de Recebimento. . . . . p. 155

77 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário B, com a Melhor Condição de Recebimento. . . . . p. 156

78 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário B, com Condição de Recebimento Neutra. . . . . p. 157

79 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário C, com a Pior Condição de Recebimento. . . . . p. 158

80 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário C, com a Melhor Condição de Recebimento. . . . . p. 159

81 Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário C, com Condição de Recebimento Neutra. . . . . p. 160

82 Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q1. . . . . p. 165

83 Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q2. . . . . p. 171

84 Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q3. . . . . p. 172

85 Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q4. . . . . p. 173

86 Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q5. . . . . p. 174

87 Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q6. . . . . p. 175

88 Circuito elétrico da antena de recepção com resistência de 50 Ω. . p. 185

Lista de Tabelas

1 Caracterização do Espaço de Sinal do QPSK (HAYKIN, 2004) . . p. 31

2 Características Técnicas de Operação da Estação de Transmissão da TV Anhanguera (TELECOMUNICACOES, 2007) . . . . . p. 40

3 Valores de Intensidade de Campo em dBμV/m. . . . . p. 40

4 Expoente de Perda para Diferentes Ambientes (RAPPAPORT, 1996) p. 47

5 Configurações de Treinamento do Perceptron com uma Única Camada Escondida. . . . . p. 78

6 Resultados Obtidos no Treinamento para Aproximação da Função do Modelo de Propagação Espaço Livre. . . . . p. 78

7 Resultados Obtidos no Treinamento para Aproximação da Função do Modelo Log-Distância. . . . . p. 81

8 Resultados Obtidos no Treinamento para Aproximação da Função do Modelo de Propagação Hata. . . . . p. 81

9 Parâmetros do sistema de transmissão. . . . . p. 88

10 Número de TSP Transmitidos Dentro de um Quadro Multiplex . . p. 89

11 Taxa do Código Interno e Sequência do Sinal de Transmissão. . . p. 94

12 Ajuste do Valor de Atraso Requerido como Resultado do *Bit Interleaving*, em Número de *Bits*. . . . . p. 94

13 Normalização do Nível de Modulação. . . . . p. 94

14 Valores do Comprimento do *Time Interleaving* e Ajuste de Atrasos para o Modo 1. . . . . p. 95

15 Valores do Comprimento do *Time Interleaving* e Ajuste de Atrasos para o Modo 2. . . . . p. 96

16 Valores do Comprimento do *Time Interleaving* e Ajuste de Atrasos para o Modo 3. . . . . p. 96

17 Frequência dos Canais VHF Alto. . . . . p. 100

18 Frequência dos Canais UHF. . . . . p. 101

19 Configuração do Analisador de Frequência para o Canal Digital da TV Anhanguera. . . . . p. 132

20 Configuração do Método de Medição. . . . . p. 132

21 Configurações de Treinamento. . . . . p. 132

22 Resultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 10 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 132

23 RResultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 20 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 132

24 Resultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 30 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 134

25 Resultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 40 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 134

26 Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 10 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 134

27 Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 20 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 134

28 Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 30 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 134

29 Valores dos Pesos da Camada de Entrada para a Camada Escondida para a Arquitetura Definida para a Recepção *One-seg*. . . . . p. 136

30 Valores dos Pesos da Camada de Entrada para a Camada Escondida para a Arquitetura Definida para a Recepção *Full-seg*. . . . . p. 136

31 Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *Full-seg* com 10 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 137

32 Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *Full-seg* com 20 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 137

33 Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *Full-seg* com 30 Neurônios na Camada Oculta. . . . . p. 137

34 Características do Ambiente para o Ponto Localizado a 1,534 km. p. 137

35 Configurações dos Cenários Propostos para a Estimação pela Rede Neural. . . . . p. 158

36 Características dos Pontos Medidos. . . . . p. 166

37 Características dos Pontos Medidos (continuação). . . . . p. 167

38 Características dos Pontos Medidos (continuação). . . . . p. 168

39 Características dos Pontos Medidos (continuação). . . . . p. 169

40 Características dos Pontos Medidos (continuação). . . . . p. 170

41 Valores de distância (km). . . . . p. 178

1 Introdução

A televisão no Brasil foi inaugurada por Assis Chateaubriand em 18 de setembro de 1950 e a programação era totalmente ao vivo devido a inexistência do videotape (VT). Na década de 60, com o advento do VT a programação era, em sua maioria, gravada para posterior exibição e reprises. Na década seguinte, a televisão a cores chega no Brasil. Mais recentemente, a televisão digital é inaugurada no Brasil no final do ano de 2007, reaquecendo as atividades na área de radiodifusão (TERRESTRE, 2008).

Em 29 de junho de 2006, o Decreto 5.820 definiu o padrão ISDB-T (do inglês: *Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*) como padrão para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) e o prazo máximo de 10 anos para a transição entre o padrão analógico para o digital. O SBTVD-T, que é assegurado ao público em geral e de forma livre e gratuita, possibilita a transmissão digital simultânea, em alta definição (do inglês: *High-Definition Television* - HDTV) ou em definição padrão (do inglês: *Standard-Definition Television* - SDTV), para recepção fixa, móvel e portátil e a interatividade (JURÍDICOS, 2006).

Um desafio para essa nova tecnologia de radiodifusão é o de determinar se a cobertura do sinal digital terá o mesmo alcance que na radiodifusão analógica, devido ao custo benefício entre qualidade e robustez do sinal pode ocasionar na cobertura do sinal.

Neste contexto, os modelos de propagação de sinal encontrados na literatura e amplamente utilizados pela telefonia móvel, são válidos também para a transmissão

do sinal digital de televisão. Assim, foram estudados os modelos de propagação espaço livre, modelo de propagação log-distância e modelo de propagação Hata (RAPPAPORT, 1996). O método de previsão ITU-R P.1546-1 também foi estudado e é de grande importância entre os métodos de propagação, pois esse método foi escolhido pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) para o cálculo dos valores de intensidade de campo para o sistema de televisão digital (TELECOMUNICACOES, 2005). Foram traçadas as curvas de intensidade de sinal para todos os modelos e método estudados nesse trabalho para a região da grande Goiânia com as características técnicas da Televisão Anhanguera (TV Anhanguera), única transmissora de TV digital até o momento. Foram realizados estudos sobre as arquiteturas de redes neurais, enfatizando a arquitetura perceptron de múltiplas camadas, os tipos de treinamento e seus algoritmos (HAYKIN, 2001). O SBTVD-T, definido pelo Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre, adota o padrão ISDB-Tb que é especificado pelas normas técnicas, elaboradas pelo Fórum juntamente com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (TERRESTRE, 2008). Dentre as normas apresentadas, deu-se ênfase às normas relativas ao sistema de transmissão de televisão digital e aos dispositivos de recepção (TÉCNICAS, 2008a) (TÉCNICAS, 2008h).

Neste trabalho foram realizadas medições de campo da intensidade de sinal para os modos de recepção *one-seg* e *full-seg* seguindo as sugestões oferecidas no Relatório ITU-R BT.2035-1 (UNION, 2004). Essas medições foram realizadas com a utilização de um analisador de radiofrequência para a obtenção da intensidade de sinal e um GPS para a exata localização (TECHNOLOGIES, 2009) (GARMIN, 2009). Os dados obtidos nas medições foram utilizados para o treinamento e validação da rede neural (arquitetura Perceptron de múltiplas camadas) utilizada para a estimação do valor da intensidade de sinal, obtendo um erro quadrático médio pequeno no treinamento e na validação da estimação. De posse de uma ferramenta de estimação treinada e validada, várias estimações foram realizadas para análise de diversos cenários.

Como resultado, este trabalho fornece uma comparação entre as intensidades medidas e os modelos de propagação, incluindo o método de previsão adotado pela ANATEL. Essa comparação revela que o sinal digital na cidade de Goiânia encontra-se abaixo dos limites mínimos estabelecidos pelos modelos e pela ANATEL. Fornece, também, uma análise entre a estimação de intensidade de sinal para diversos cenários propostos, fazendo um contraponto com a realidade encontrada na cidade de Goiânia.

1.1 Organização da Dissertação

Esta dissertação é composta de seis capítulos descritos a seguir.

No Capítulo 2, Preliminares Teóricas, é apresentado um breve resumo teórico sobre os conceitos utilizados nessa dissertação.

No Capítulo 3, Redes Neurais Artificiais, são detalhadas as teorias relacionadas ao Perceptron e o Perceptron de Múltiplas Camadas. Especificamente, para o Perceptron de múltiplas camadas são apresentados os tipos de aprendizados e descrito o processo de aprendizagem supervisionado utilizando o algoritmo de retropropagação do erro.

No capítulo 4, são apresentadas as normas referentes ao padrão ISDB-Tb adotado para transmissão de TV digital no Brasil. Dentre as normas publicadas até o momento, dar-se-á ênfase nas normas referentes ao sistema de transmissão e aos dispositivos de recepção.

No capítulo 5, são apresentados o método e os equipamentos utilizados na campanha de medidas da intensidade do sinal de TV digital. Apresenta-se a arquitetura da rede neural, determinada através de várias combinações de treinamento com os dados obtidos na campanha de medidas. A arquitetura é definida pelo menor erro quadrático médio de treinamento e na validação da estimação. São apresentados ainda os cenários propostos para a estimação da intensidade de sinal através da

rede neural e seus resultados.

Finalmente, o capítulo 6 sintetiza os tópicos mais relevantes do trabalho e sugere novas abordagens.

2 Preliminares Teóricas

ESTE capítulo introduz os conceitos básicos para a boa compreensão da proposta deste trabalho. Inicia-se pela descrição dos métodos de modulação digital utilizados pelo SBTVD-T. Em seguida, é apresentada uma descrição do sistema de transmissão digital e as características técnicas de operação da estação de radiodifusão de sons e imagens digital da Televisão Anhanguera, única operadora que oferece o sinal digital no Estado de Goiás atualmente. São apresentados ainda, os modelos de propagação, para estimativa dos níveis de cobertura. Finalmente, é apresentado o Sistema de Informações Geográficas da Agência Nacional de Telecomunicações (SIGANATEL), acessível no portal da ANATEL.

2.1 Modulação Digital

O processo de modulação baseia-se na variação de um dos parâmetros, amplitude ou frequência, da onda portadora senoidal de acordo com o sinal que se quer modular. Na modulação digital a variação da onda portadora senoidal é realizado pela alternância entre valores discretos, acompanhando o sinal de entrada (CARVALHO, 2003).

O SBTVD-T, normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), prevê a utilização de quatro tipos de modulação digital. São elas: Chaveamento em Quadratura de Fase (do inglês: *Quadrature Phase-Shift Keying* - QPSK), Chaveamento em Quadratura de Fase Diferencial (do inglês: *Differential*

Quadrature Phase-Shift Keying - DQPSK), 16 e 64 Modulação de Amplitude em Quadratura (do inglês: *Quadrature Amplitude Modulation* - QAM) (TÉCNICAS, 2008a).

2.1.1 Chaveamento em Quadratura de Fase (QPSK)

Na modulação QPSK, o parâmetro da onda portadora senoidal que varia de acordo com o sinal a ser modulado é a fase, ou seja, a informação está contida na fase do sinal transmitido. Portanto, o sinal transmitido é definido como

$$s_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[2\pi f_c t + (2i-1)\frac{\pi}{4}\right], & 0 \leq t \leq T \\ 0, \quad \text{caso contrário} \end{cases}, \tag{2.1}$$

onde $i = 1, 2, 3, 4$, E é a energia do sinal transmitido por símbolo, T é a duração do símbolo e f_c a frequência da portadora (HAYKIN, 2004).

Expandido a equação (2.1) através de uma identidade trigonométrica, para o intervalo $0 \leq t \leq T$, tem-se (HAYKIN, 2004)

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[(2i-1)\frac{\pi}{4}\right] \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E}{T}} \text{sen}\left[(2i-1)\frac{\pi}{4}\right] \text{sen}(2\pi f_c t). \tag{2.2}$$

Observando a equação (2.2) , nota-se a presença de duas funções base ortonormais formando um par de portadoras em quadratura, $\varphi_1(t)$ e $\varphi_2(t)$, (HAYKIN, 2004)

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T \tag{2.3}$$

e

$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \text{sen}(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T. \tag{2.4}$$

Observando também a equação (2.2), percebe-se que a fase da portadora assume um dentre quatro valores igualmente espaçados, em que cada valor possível de fase corresponde a um *dibit* único, fornecido na Tabela 1 (HAYKIN, 2004), onde

$$s_i = \begin{bmatrix} \sqrt{E}cos\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right) \\ -\sqrt{E}sen\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix}, \quad \text{i=1,2,3,4.} \tag{2.5}$$

Tabela 1: Caracterização do Espaço de Sinal do QPSK (HAYKIN, 2004)

Dibit de entrada	Fase do Sinal QPSK (rad)	S_{i1}	S_{i2}
00	$3\pi/4$	$-\sqrt{E/2}$	$-\sqrt{E/2}$
01	$5\pi/4$	$-\sqrt{E/2}$	$+\sqrt{E/2}$
10	$\pi/4$	$+\sqrt{E/2}$	$-\sqrt{E/2}$
11	$7\pi/4$	$+\sqrt{E/2}$	$+\sqrt{E/2}$

Dessa forma, o sinal QPSK possui uma constelação bidimensional, devido a $\varphi_1(t)$ e $\varphi_2(t)$, e quatro pontos de mensagem, apresentados na Figura 1 (HAYKIN, 2004).

2.1.2 Chaveamento em Quadratura Diferencial (DQPSK)

A modulação por Chaveamento em Quadratura Diferencial é uma variação da modulação QPSK, na qual ao invés de ser enviado um símbolo correspondente a um parâmetro puro de fase, este símbolo representa uma variação de fase (HAYKIN, 2001).

O fluxo de *bits* responsável pela geração da componente em quadratura é deslocado em metade do intervalo do símbolo em relação ao fluxo de *bits* responsável pela geração da componente em fase. Assim, as duas funções base são definidas como

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}}\cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T \tag{2.6}$$

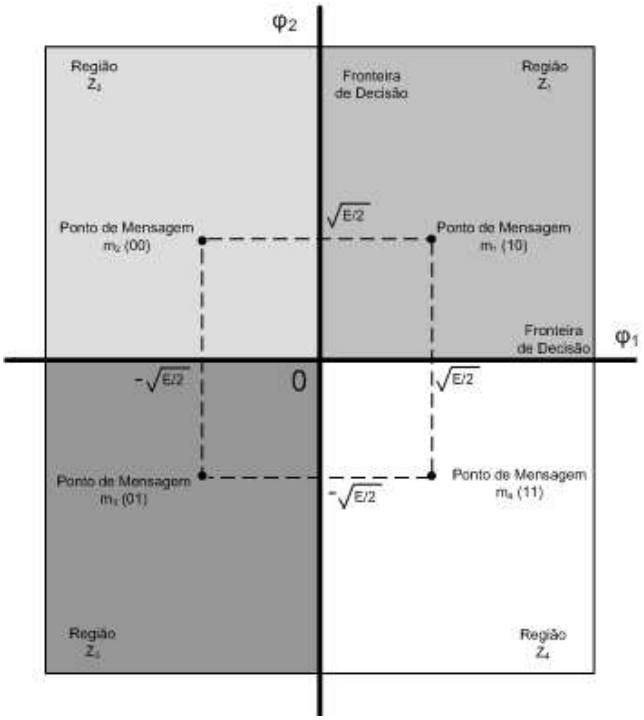


Figura 1: Diagrama de Espaço do Sinal do Sistema QPSK Coerente.

e

$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}}\text{sen}(2\pi f_c t), \quad T/2 \leq t \leq 3T/2. \tag{2.7}$$

Dessa forma, as transições de fase no DQPSK limitam-se a ± 90 graus, como é apresentado no diagrama de espaço do sinal, Figura 2 (HAYKIN, 2001).

2.1.3 Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM)

A Modulação de Amplitude em Quadratura M-ária é um esquema de modulação híbrida, pois suas componentes em fase e em amplitude são independentes, ou seja, a portadora executa uma modulação de amplitude e uma modulação de fase assumindo um dos M símbolos possíveis (HAYKIN, 2001).

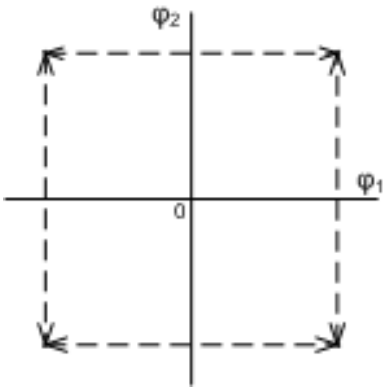


Figura 2: Possíveis Caminhos de Comutação entre Fases no DQPSK.

Nessa modulação, o número de símbolos possíveis, M, é uma potência par de 2, ou seja (CARVALHO, 2003)

$$M = 2^n, \quad n = 2, 4, 6, ... \quad bits. \tag{2.8}$$

O sinal modulado QAM, $s_k(t)$, consiste em duas portadoras em fase e em quadradura, formando o seguinte par de funções de base ortogonais

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}}\cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T \tag{2.9}$$

e

$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}}\text{sen}(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T, \tag{2.10}$$

onde f_c é a freqüência da portadora (HAYKIN, 2001).

Cada uma dessas funções base ortogonais são moduladas por um conjunto de amplitudes discretas, resultando no sinal QAM dado por

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E_o}{T}} a_k \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_o}{T}} b_k \text{sen}(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T, \tag{2.11}$$

onde $k = 0, \pm 1, \pm 2, ...M$ e E_o é a energia do sinal que possui a menor amplitude (HAYKIN, 2001).

A Figura 3 apresenta uma constelação para a modulação 64-QAM, onde $n = 6$.

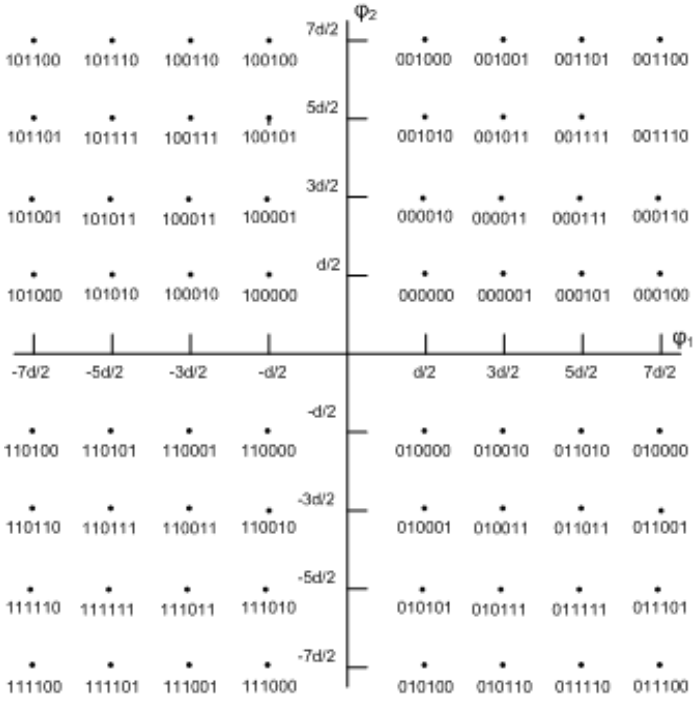


Figura 3: Espaço de Sinal para a Modulação 64-QAM.

A Figura 4 apresenta uma constelação para a modulação 16-QAM.

2.2 Sistema de Transmissão Digital

EM um sistema de transmissão digital, a informação a ser transmitida é transformada em um conjunto de valores discretos representados por dígitos numéri-

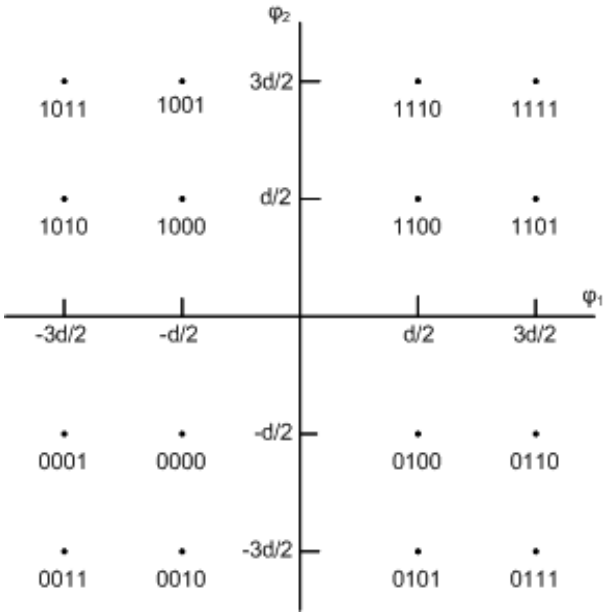


Figura 4: Espaço de Sinal para a Modulação 16-QAM.

cos para então ser transmitida. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos de um Sistema de Transmissão Digital (SKLAR, 1988).

O transmissor digital é composto por quatro estágios: codificador de fonte, codificador de canal, modulador digital e amplificador de potência. O codificador de fonte tem o objetivo de reduzir a informação redundante do sinal de entrada de forma a utilizar o menor número de *bits* possível para sua representação sem inserir perdas significativas, para isso, o sinal de entrada deve ser discreto. O codificador de canal desempenha um papel contrário; ele introduz, de forma controlada, na sequência de informação uma quantidade de informação redundante, informação que é utilizada pelo receptor para detecção e correção de erros originários no momento da transmissão. Em seguida, a sequência de informação é enviada ao modulador digital que mapeia a sequencia binária vinda do codificador de canal em um conjunto de M valores distintos de parâmetros de um sinal elétrico. Por último, o sinal elétrico é amplificado para então ser transmitido (SKLAR, 1988).

O canal de transmissão é o meio físico utilizado para enviar a informação

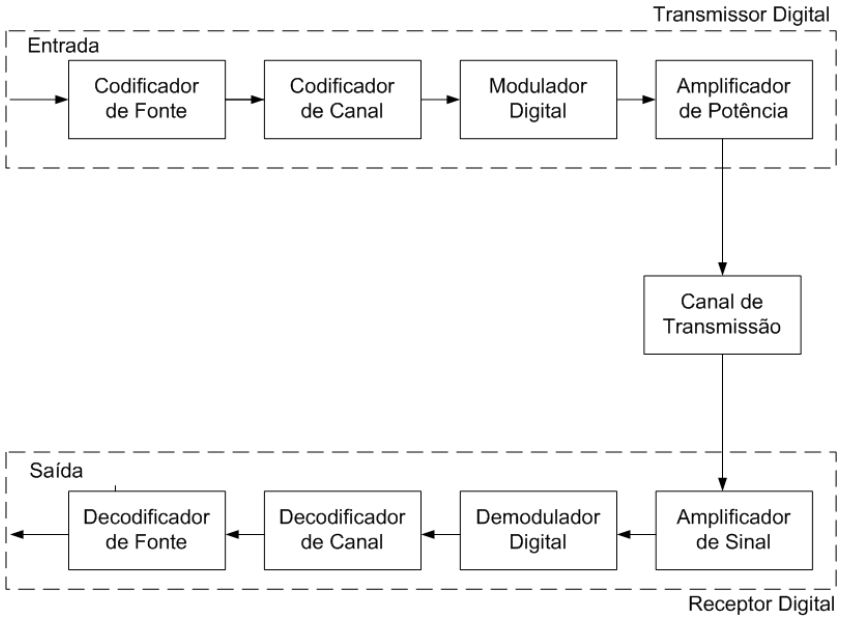


Figura 5: Diagrama de Blocos do Sistema de Transmissão Digital.

do transmissor para o receptor. Independente do tipo de canal de transmissão, o sinal é corrompido de maneira aleatória por diversos mecanismos como: ruído térmico aditivo, ruídos industriais, interferência, reverberação no canal, entre outros (SKLAR, 1988).

No último estágio da comunicação digital encontra-se o receptor digital, composto por: amplificador de sinal, demodulador digital, decodificador de canal e decodificador de fonte. O demodulador digital processa o sinal, corrompido pelo canal de transmissão e amplificado pelo amplificador de sinal, e o reduz a uma sequência numérica representando as estimativas dos símbolos de dados transmitidos. De posse dessa sequência numérica, o decodificador de canal tenta reconstruir a sequência de informação original a partir do conhecimento do código utilizado pelo codificador de canal e da redundância controlada contida na informação. No último estágio, o decodificar de fonte tenta recuperar o sinal de entrada original baseado no método usado pelo codificador de fonte no transmissor, devido a série de erros inseridos no canal de transmissão. O sinal recuperado pode não represen-

tar o sinal de entrada por completo e sim uma estimativa (SKLAR, 1988).

A partir da apresentação das características técnicas de operação da estação de transmissão em televisão (TV Anhanguera), pode-se concluir que o canal de transmissão (Figura 5), que neste caso, utiliza o ar como meio de transmissão é conhecida por radiodifusão (do inglês: *broadcasting*). Em quatro de agosto de 2008, a empresa de radiodifusão Televisão Anhanguera S.A. iniciou a transmissão do sinal de televisão digital para a região da grande Goiânia, tornando-se a primeira filial da Rede Globo a disponibilizá-lo (GOIASNET, 2007).

O sinal digital é disponibilizado no canal 34 UHF (do inglês: *Ultra High Frequency*), ocupando a faixa de frequência de 590 a 596 MHz. A Estação de transmissão é localizada no bairro Jardim Petropólis na cidade de Goiânia (Estado de Goiás), tendo 910 metros como cota da base da torre e é composta por um sistema principal e um auxiliar com características próprias (TELECOMUNICACOES, 2007).

O sistema principal é composto por um transmissor com uma potência de operação de 3,4 kW; uma antena principal omnidirecional de polarização horizontal, sendo a altura do centro de irradiação da antena em relação a cota da base da torre (HCI) de 95 metros e ganho máximo de 10,6 dBd da fabricante *KATHREIN WERKE KG*, modelo 774 041; e pela linha de transmissão com 109 m de comprimento da fabricante *ANDREW IND. E COMÉRCIO LTDA*. O sistema auxiliar é composto por um transmissor com uma potência de operação de 1,7 kW; e uma antena auxiliar omnidirecional de polarização horizontal, HCI de 96,2 metros e ganho máximo de 7,6 dBd da fabricante *KATHREIN WERKE KG*, modelo 774 041. A estação de transmissão, composta pelos dois sistemas (principal e auxiliar), possui uma potência efetiva irradiada de 21,11 kW. A Tabela 2 apresenta as característica técnicas dos dois sistemas (TELECOMUNICACOES, 2007).

2.3 Modelos de Propagação

O planejamento das áreas de coberturas do sinal de televisão digital requer a estimativa prévia dos níveis do sinal. Para tanto, utiliza-se modelos de propagação cujos resultados aproximem ao máximo da realidade. Nesta seção serão apresentados o modelo da Recomendação ITU-R P.1546-1, o modelo de Propagação em Espaço-Livre, o modelo de Perda de Propagação Log-Distância e o modelo de Propagação Hata. O efeito da difração na propagação dos sinais também é apresentado.

2.3.1 Recomendação ITU-R P.1546-1

Em sete de abril de 2005, a ANATEL aprovou a Resolução N° 398 que prevê alterações no Regulamento Técnico para Emissoras de Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada e no Regulamento Técnico para a Prestação do Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens e do Serviço de Retransmissão de Televisão (TELECOMUNICACOES, 2005).

Entre as alterações propostas pela Resolução N° 398 está a inclusão dos Critérios Técnicos para Estudos Envolvendo Canais Digitais, Anexo 3, tendo como objetivo determinar os critérios para a elaboração de projetos de viabilidade de inclusão de canais digitais no Plano Básico de Distribuição de Canais de TV Digital (PBTVD). O Anexo 3 prevê, na seção de estudo de viabilidade técnica de canal digital, a utilização da Recomendação ITU-R P.1546-1 para a determinação dos contornos e dos valores de intensidade de campo dos canais digitais (TELECOMUNICACOES, 2005).

O método de previsões ponto-área para serviços terrestres é válido na faixa de 30 a 3000 MHz. Seus resultados são apresentados através de curvas de propagação ou por tabulações onde são apresentados os valores de intensidade de campo para um potência efetiva irradiada de 1 kW (e.r.p.) nas frequências nominais 100, 600 e 2000 MHz. As curvas de propagação representam os valores de intensidade

de campo excedidos em 50%, 10% e 1% do tempo e valores de intensidade de campo excedidos em 50% das localidades, dentro de um quadrado de 200 por 200 metros. Caso a frequência, a distância entre as antenas transmissoras e receptoras, a variabilidade de tempo e/ou variabilidade de localidade não sejam as nominais das curvas de propagação, a Recomendação ITU-R P.1546-1 fornece os métodos de interpolação e extrapolação necessários (UNION, 2003).

A Recomendação, em seu Anexo 6, apresenta um procedimento passo-a-passo para sua aplicação. Todos os passos necessários para a implementação computacional do método proposto e de todas as interpolações necessárias são demonstrados. O procedimento apresentado no Anexo 6 da Recomendação é descrito no Apêndice A (UNION, 2003).

A recomendação fornece, também, uma forma de comparação com o objetivo de validar a implementação. A comparação é realizada com o método de Okumura-Hata, que tem o comportamento de resposta da intensidade de campo em dBμV/m para 1 kW e.r.p. semelhante ao encontrado na ITU-R P.1546-1, para as condições de altura efetiva da antena receptora de $1,5$ m acima do solo, a uma distância máxima de 10 km e altura da antena receptora/móvel de referência de 15 m. O método Okumura-Hata é apresentado no Apêndice B. A Tabela 3 fornece o valor da intensidade de campo em dBμV/m para 1 kW e.r.p., para uma frequência de 600 MHz e altura da antena transmissora acima do solo de 75 metros, para o método Okumura-Hata de validação e o método ponto-área da ITU-R P.1546-1 para uma porcentagem de tempo de 10 % (UNION, 2003).

A Figura 6 apresenta o comportamento de ambos os métodos, Okumura-Hata e Recomendação ITU-R P.1546-1. Nota-se que o comportamento de ambos os métodos são semelhantes, ou seja, o decaimento da intensidade do campo em função da distância ocorre de forma assintótica.

A Figura 7 apresenta as curvas de intensidade de campo adquiridas pelo método ITU-R P.1546-1 com variabilidade de tempo de 10% e 50% para uma potência irradiada de 1 kW e.r.p. e características da TV Anhanguera descritas

Tabela 2: Características Técnicas de Operação da Estação de Transmissão da TV Anhanguera (TELECOMUNICACOES, 2007)

	Sistema Principal	Sistema Auxiliar
Potência de Operação do Transmissor (kW)	3,4	1,7
Descrição da Antena	Omnidirecional	Omnidirecional
Ganho Máximo da Antena (dBd)	10,6	7,6
HCI da Antena (m)	95	96,2

Tabela 3: Valores de Intensidade de Campo em dBμV/m.

Distância (km)	Método Okumura-Hata	Método ITU-R P.1546-1
1	80,0388	75,48837
2	70,2197	67,18754
3	64,4759	62,26310
4	60,4006	58,68731
5	57,2395	55,82146
6	54,6568	53,38593
7	52,4731	51,23630
8	50,5815	49,28966
9	48,9129	47,49909
10	47,4204	45,83377

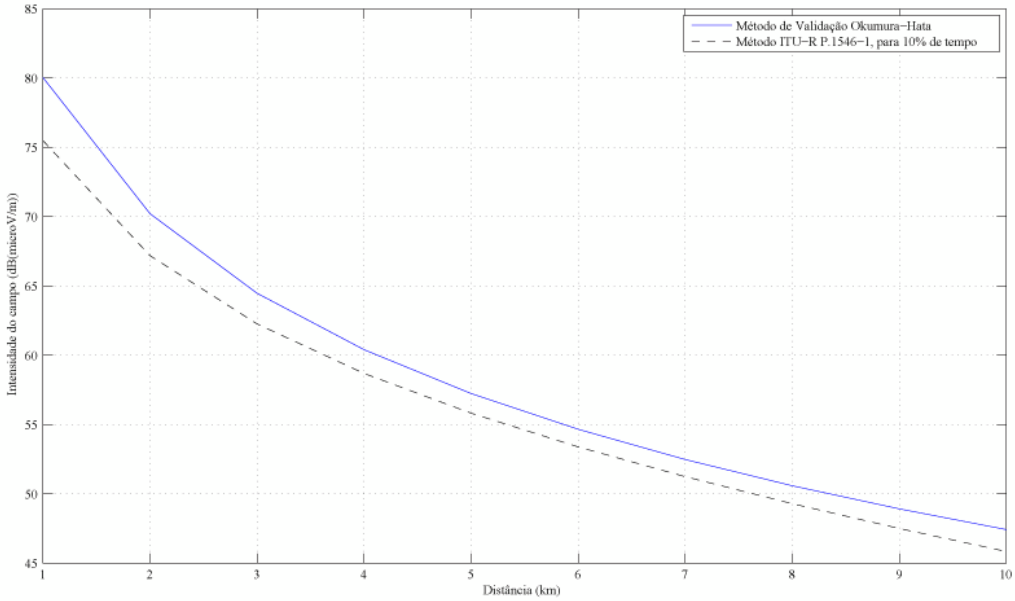


Figura 6: Curvas de Intensidade de Campo para 1 kW e.r.p..

na Tabela 2.

A Recomendação ITU-R P.1546-1 fornece valores de intensidade de campo em dBμV/m para 1 kW e.r.p., contudo, como visto na seção anterior, o sistema de transmissão digital da TV Anhanguera tem uma potência efetiva irradiada de 21,116 kW. As equações que serão descritas a seguir tem o objetivo de converter a intensidade de campo em dBμV/m para 1 kW e.r.p., obtida pela Recomendação ITU-R P.1546-1, para dBμV/m para 21,116 kW e.r.p., que é a potência de transmissão efetiva irradiada da TV Anhanguera.

A intensidade de campo em V/m é dada por

$$E = \frac{\sqrt{60Perp}}{d}, \tag{2.12}$$

onde E é a intensidade de campo em (V/m), $Perp$ é a potência efetiva irradiada em watts e d é a distância em metros entre a antena transmissora e a receptora. Essa equação é valida para o espaço livre (KRAUS, 1989).

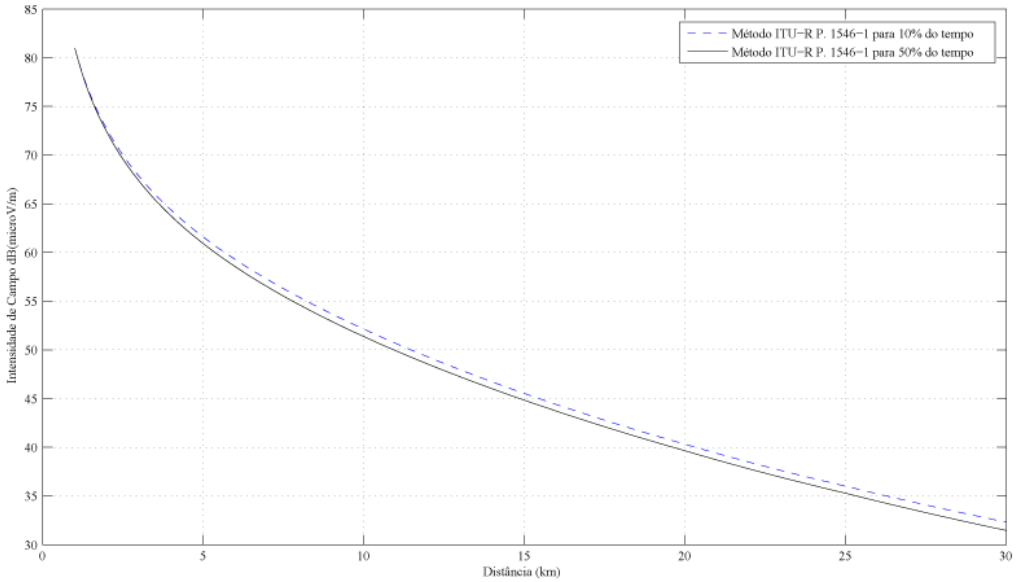


Figura 7: Curvas de Intensidade de Campo Adquiridas Através do Método ITU-R P.1546-1 com Variabilidade de Tempo de 10% e 50% para uma Potência Irradiada de 1 kW e.r.p..

A conversão de unidade de (V/m) para dBμV/m é realizada pela equação dada por

$$E = 20log\frac{Ei}{c}, \tag{2.13}$$

onde E é a intensidade de campo em dBμV/m, Ei é a intensidade de campo em μ V/m e c é uma constante de valor 1 μV/m (KRAUS, 1989).

Utilizando as Equações 2.12 e 2.13 para calcular a intensidade de campo em μV/m para os casos de potência efetiva irradiada de 21, 116 kW da Tv Anhanguera, e 1 kW, Recomendação ITU-R P.1546-1, considerando uma distância de 10 km; encontra-se uma intensidade de campo de 101, 027 μV/m para as características da TV Anhanguera e de 87, 78 dB(μV/m) para a Recomendação ITU-R P.1546-1. Nota-se que a variação entre a intensidade da TV Anhanguera e da Recomendação é de 13, 247 dB. Assim, para converter um ponto na curva de 1 kW e.r.p., Recomendação ITU, para uma potência efetiva irradiada de 21,116 kW, adiciona-se 13, 247

dB ao valor original dado obtido para 1 kW e.r.p. (KRAUS, 1989).

A Figura 8 apresenta duas curvas com os valores de intensidade de campo com variabilidade de tempo de 10% e 50% obtidas através da Recomendação ITU-R P.1546-1, considerando as características da TV Anhanguera, fornecidas na seção anterior, com os valores adaptados para uma potência e.r.p. de $21,116$ kW e uma antena de recepção com altura máxima acima do solo de 2 m.

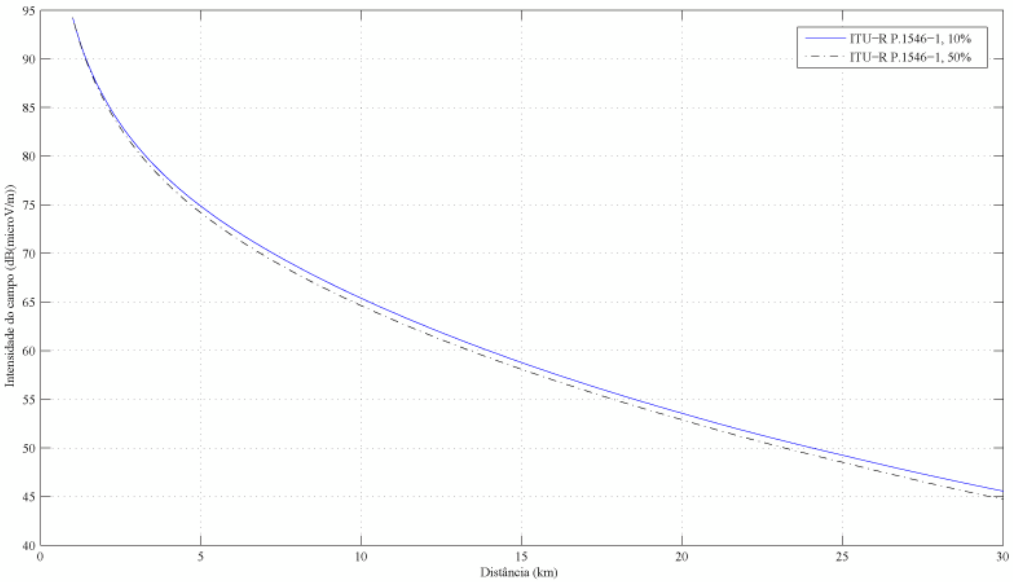


Figura 8: Curvas de Intensidade de Campo Adquiridas Através do Método ITU-R P.1546-1 com Variabilidade de Tempo de 10% e 50% para uma Potência Irradiada de 21,116 kW e.r.p..

Na Figura 8 observa-se que a curva com variabilidade de tempo de 50% possui uma menor intensidade de campo devido a variação do tempo de chegada de diversas ondas de sinal. Essa variação é conseqüência dos múltiplos percursos e obstáculos, localizados entre as antenas transmissora e receptora, encontrados pela frente de onda.

2.3.2 Modelo de Propagação em Espaço Livre

O modelo de propagação em espaço livre representa a situação em que o transmissor e o receptor localizam-se em um espaço livre de obstruções e de reflexões em qualquer direção, sendo a potência do sinal recebido calculada em qualquer ponto, sendo representado pela antena receptora (RAPPAPORT, 1996).

O modelo prediz que a potência recebida decai em função da distância que separa a antena transmissora da antena receptora. A potência do sinal recebido é dada pela equação de *Friis*

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, \tag{2.14}$$

onde P_t é a potência transmitida, $P_r(d)$ é a potência recebida em função da distância que separa a antena transmissora da antena receptora, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, d é a distância que separa transmissor do receptor em metros, L é o fator de perda do sistema não relacionado a propagação ($L \geq 1$) e λ é o comprimento de onda (RAPPAPORT, 1996).

Os valores das potências transmitida e recebida (P_t e $P_r(d)$) são expressos na mesma unidade e os valores de ganho (G_t e G_r) são adimensionais. As perdas representadas por L são, geralmente, devidas as atenuações das linhas de transmissão, perdas nas antenas e nos filtros (RAPPAPORT, 1996).

Sabe-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional a freqüência em Hertz (Hz), dado por

$$\lambda = \frac{C}{f}, \tag{2.15}$$

onde C é a velocidade da luz no vácuo (RAPPAPORT, 1996).

O ganho de qualquer antena está relacionado com sua abertura efetiva (A_e), dado por (RAPPAPORT, 1996)

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}. \tag{2.16}$$

A equação de *Friis*, equação (2.14), é valida apenas para predições cujos valores de d estejam no campo-distante, ou região *Fraunhofer*, da antena transmissora, ou seja, que estejam a uma distância mínima, denominada distância de *Fraunhofer*, da antena transmissora d_f, dada pela equação (2.17), e satisfaça as duas condições mostradas nas equações (2.18) e (2.19) (RAPPAPORT, 1996).

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \tag{2.17}$$

onde D é a maior dimensão física e linear da antena transmissora (RAPPAPORT, 1996).

$$d_f >> D \tag{2.18}$$

e

$$d_f >> \lambda. \tag{2.19}$$

Aplicando os dados da Estação de Transmissão do Sistema Principal da Televisão Anhanguera na cidade de Goiânia (Tabela 2 da seção 2.2) no Modelo de Propagação em Espaço Livre, determina-se a intensidade do sinal, em dBm, conforme apresenta a Figura 9.

Analisando a Figura 9, nota-se que a intensidade do sinal decai assintoticamente com a distância entre a antena transmissora e a receptora e que para o cenário da cidade de Goiânia. Note que neste cenário, a intensidade varia de -1,8795 a -41,8795 dBm (distância entre 200 metros e 30 quilômetros).

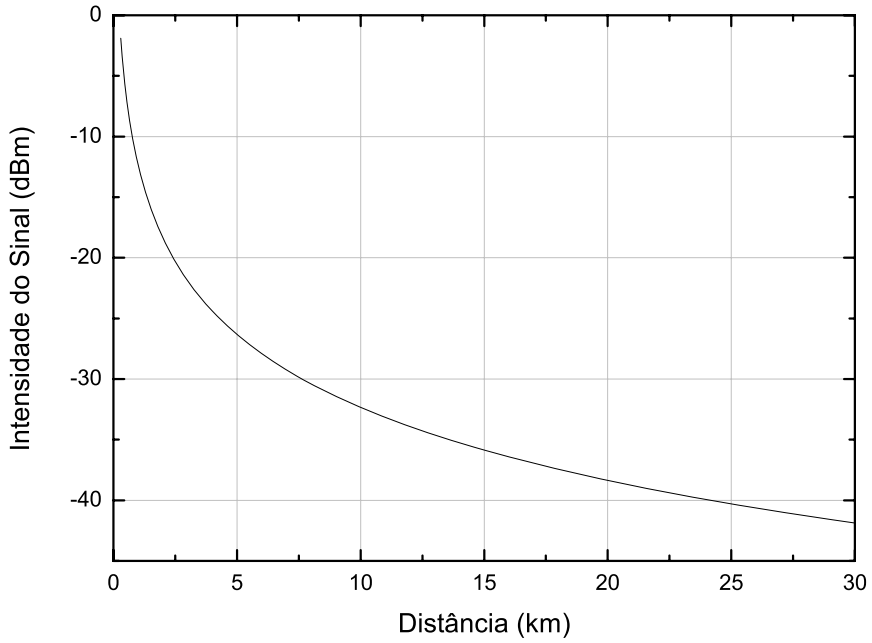


Figura 9: Modelo de Propagação Espaço Livre para a Estação de Transmissão da Televisão Anhanguera na Cidade de Goiânia.

2.3.3 Modelo de Perda de Propagação Log-Distância

A maioria dos modelos de propagação de rádio derivam da combinação dos métodos analítico e empírico. Ambos os métodos, teóricos e baseados em medições, indicam que a potência média do sinal recebido decresce logaritmicamente em função da distância. A potência recebida do sinal é dada por

$$Pr(dBm, d) = Pr(dBm, d_0) - 10nlog\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{2.20}$$

onde *Pr(dBm,d)* é a intensidade do sinal em dBm no ponto de recepção, $Pr(dBm, d_0)$ é a intensidade do sinal em dBm no ponto de referência adquirido através de medição, d_0 é a distância de referência próxima a antena de transmissão, d é a

distância que separa o transmissor do receptor e n é o expoente de perda de propagação que indica a taxa com que a perda aumenta com a distância (RAPPAPORT, 1996).

A distância de referência deve, sempre, estar no campo-distância da antena transmissora para que os efeitos do campo-próximo não alterem o valor da atenuação do sinal no ponto de referência. O valor de n é específico para cada ambiente de propagação. A Tabela 4 apresenta valores típicos de n para vários ambientes (RAPPAPORT, 1996).

Tabela 4: Expoente de Perda para Diferentes Ambientes (RAPPAPORT, 1996)

Ambiente	Expoente de Perda de Propagação (n)
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana sombreada	3 a 5
Obstrução da Visada Direta	4 a 6
Obstruído por Edifícios	4 a 6
Obstruído por Fábricas	2 a 3

Aplicando os dados da Estação de Transmissão do Sistema Principal da Televisão Anhanguera na cidade de Goiânia (Tabela 2 da seção 2.2) no Modelo de Perda de Propagação Log-Distância com uma intensidade de sinal de referência o valor de $-33,3357$ dBm medido a 200 metros da antena transmissora, para um expoente de perda igual a 2,7 obtém-se a intensidade do sinal, em dBm, conforme apresenta a Figura 10.

Percebe-se na Figura 10 que a intensidade do sinal decaí logaritmicamente em função da distância, chegando a -92 dBm a uma distância de 30 km da antena transmissora.

2.3.4 Modelo de Propagação Hata

O Modelo de Propagação Hata é uma formulação empírica dos dados gráficos, valores de atenuação, fornecidos pelo modelo de Okumura. Hata fornece a

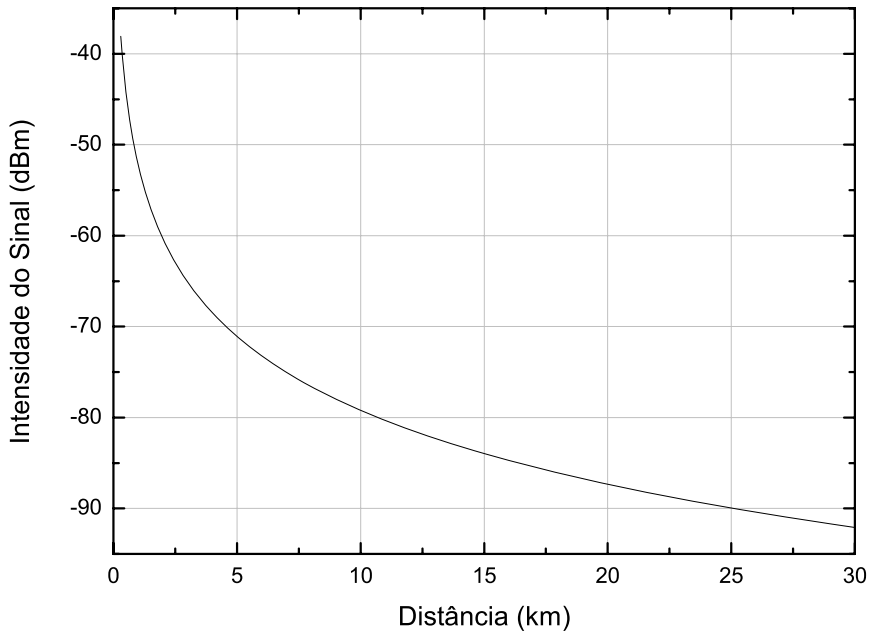


Figura 10: Modelo de Perda de Propagação Log-Distância para a Estação de Transmissão da Televisão Anhanguera na Cidade de Goiânia.

atenuação em área urbana através de uma fórmula padrão válida para a faixa de frequência de 150 MHz até 1.500 MHz, dada por

$$L_{50} = 69,55 + 26,16log(f_c) - 13,82log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55log(h_{te}))log(d), \tag{2.21}$$

onde f_c é a frequência (MHz) da onda eletromagnética; h_{te} é a altura efetiva da antena transmissora (estação base) em metros, na faixa de 30 metros até 200 metros; h_{re} é a altura efetiva da antena receptora em metros, na faixa de 1 metro até 10 metros; d é a distância entre a antena transmissora e a antena receptora em quilômetros; e $a(h_{re})$ é o fator de correção em função da área de cobertura (RAPPAPORT, 1996).

Existem duas fórmulas para o cálculo de $a(h_{re})$. Para pequenas e médias cidades, o fator de correção em dB é dado por (RAPPAPORT, 1996)

$$a(h_{re}) = (1,1log(f_c) - 0,7)h_re - (1,56log(f_c) - 0,8). \tag{2.22}$$

Para grandes cidades, o fator de correção é dado por (RAPPAPORT, 1996)

$$a(h_{re}) = 8,29(log(1,54h_{re}))^2 - 1,1 \quad \text{dB} \quad para \quad f_c \leq 300MHz \tag{2.23}$$

e

$$a(h_{re}) = 3,2(log(11,75h_{re}))^2 - 4,97 \quad \text{dB} \quad para \quad f_c \geq 300MHz. \tag{2.24}$$

Para a aplicação do Modelo de Propagação Hata na cidade de Goiânia, adotou-se o fator de correção para grandes cidades. Através dos dados oferecidos na Tabela 2 da Seção 2.2, a faixa de frequência do fator de correção a ser utilizado deve incluir a frequência da portadora central (593 + 1/7 MHz). Assim, $a(h_{re})$ é dado pela equação (2.24).

Para a determinação da intensidade do sinal de recepção, através do modelo de propagação Hata, é necessário adicionar ao valor da atenuação, calculado pelo modelo, a potência de transmissão juntamente com o ganho da antena transmissora. A potência de transmissão, em dBm, é dado por $10.log(\frac{34000}{10^{-3}})$ e o ganho da antena transmissora é igual a 10,6 dBd. Portanto, a cobertura do sinal de televisão digital para o Modelo de Propagação Hata obtido é apresentado pela Figura 11.

A partir dos resultados encontrados e apresentados pelas Figuras 9 a 11, o modelo de propagação Log-Distância é o que apresenta a mais baixa intensidade de sinal para a cidade de Goiânia. Em todos esses casos, percebe-se que a medida em que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta, a intensidade do sinal decresce rapidamente. Para o Modelo de Propagação Hata e cenário proposto, a

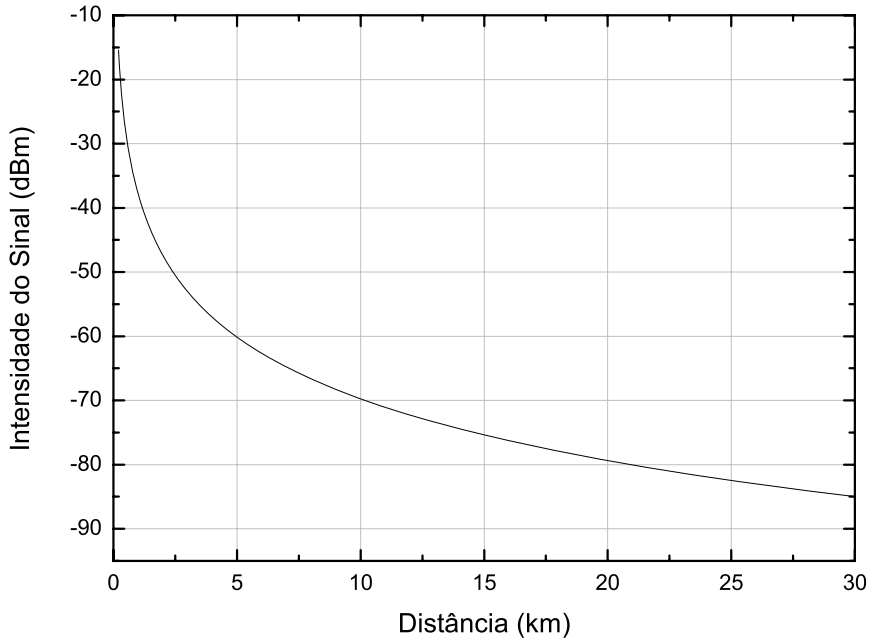


Figura 11: Modelo de Propagação HATA para Grandes Cidades para a Estação de Transmissão da Televisão Anhanguera na Cidade de Goiânia.

uma distância de 30 km do transmissor, o receptor terá uma intensidade de sinal aproximadamente de -85 dBm.

2.3.5 Difração

Difração é o fenômeno que permite que os sinais se propaguem em torno da superfície curvada da terra e por trás das obstruções. No entanto, a potência no receptor diminui rapidamente quando o receptor se encontra em regiões obstruídas, áreas sombreadas (RAPPAPORT, 1996).

O fenômeno da difração é explicado pelo princípio de Huygen que afirma que todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como pontos de produção de fontes secundárias de ondas. Essas ondas se combinam para produzir

uma nova frente de onda na direção de propagação.

Considere um transmissor e receptor separados no espaço livre, conforme apresentado na Figura 12, com um obstáculo de altura efetiva h localizado a uma distância d_1 do transmissor e a uma distância d_2 do receptor. É evidente que a distância percorrida pela onda de propagação do transmissor ao receptor através do topo da obstrução é maior do que se percorresse em visada direta (RAPPAPORT, 1996).

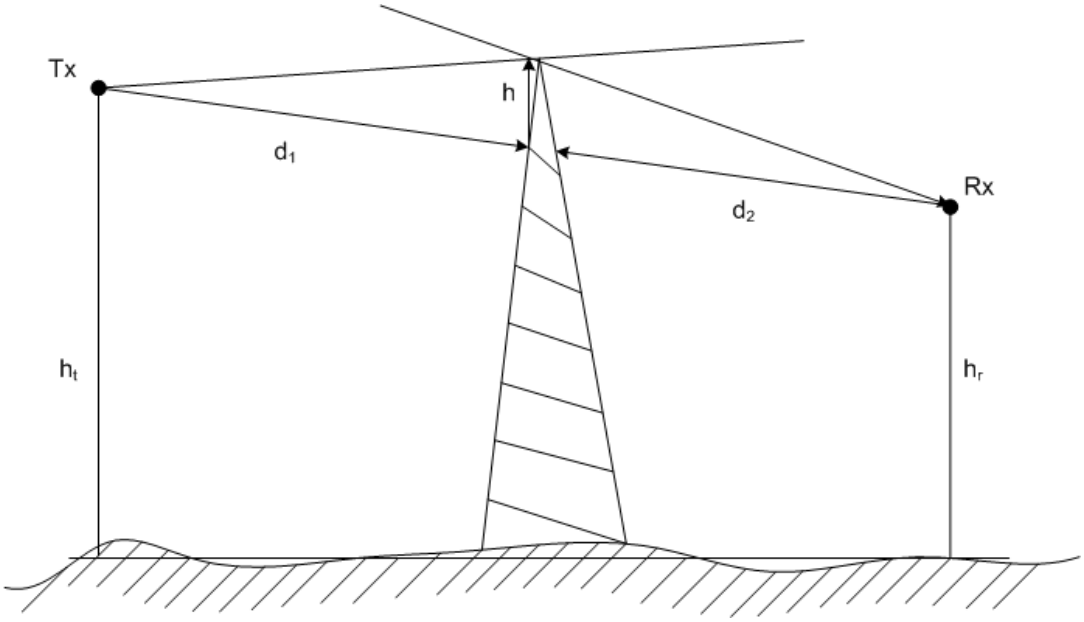


Figura 12: Geometria de Difração.

Através dos valores do comprimento de onda e das distâncias entre transmissor-obstrução e obstrução-receptor, é possível determinar o parâmetro de difração de *Fresnel-Kirchoff*, parâmetro adimensional, determinado por

$$v = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}. \tag{2.25}$$

O ganho de difração é função do parâmetro de difração de *Fresnel-Kirchoff*, e é calculado como se segue

$$
\begin{aligned}
G_d &= 0 && v \leq -1, \\
G_d &= 20log(0,5 - 0,62v) && -1 \leq v \leq 0, \\
G_d &= 20log(0,5exp(-0,95v)) && 0 \leq v \leq 1, \\
G_d &= 20log(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2} && 1 \leq v \leq 2,4, \\
G_d &= 20log(\tfrac{0,225}{v}) && v \geq 2,4.
\end{aligned} \tag{2.26}
$$

2.4 Sistema de Coordenadas e de Informações Geográficas

Os sistemas de coordenadas são utilizados para expressar a posição de um ponto sobre uma superfície. Alguns conceitos serão descritos para uma melhor compreensão sobre esses sistemas.

Os meridianos são círculos que dividem a Terra em duas partes iguais de pólo a pólo e cruzam entre si, ambos os pólos. O mais famoso meridiano é o Greenwich, também conhecido como Meridiano Zero. Os paralelos são círculos que cruzam os meridianos perpendicularmente. O paralelo mais conhecido é o do Equador (ESTATÍSTICA, 2006).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) define latitude geográfica como o arco contado sobre o meridiano local e que vai do Equador até o lugar considerado. A latitude quando medida no hemisfério norte é chamada de latitude norte ou positiva, enquanto que, a medida no hemisfério sul é chamada de latitude sul ou negativa; seus valores encontram-se no intervalo de 0 a 90 graus. Já a longitude é definida como o arco contado a partir do Equador e que vai de Greenwich até o meridiano do referido lugar. A longitude contada no sentido oeste é chamada de longitude oeste de Greenwich (W) ou negativa, enquanto que, a longitude contada no sentido leste é chamada de longitude leste de Greenwich (E) ou positiva; podendo assumir valores entre 0 a 180 graus (ESTATÍSTICA, 2006).

A ANATEL disponibiliza *on-line* em seu sítio na Internet a ferramenta SIGANATEL, um módulo de cálculo de viabilidade técnica, que reduz em até 70% o tempo gasto para a realização de estudos de viabilidade de sistemas de radiodifusão. A Figura 13 apresenta o *layout* do sistema SIGANATEL (TELECOMUNICACOES, 2006).

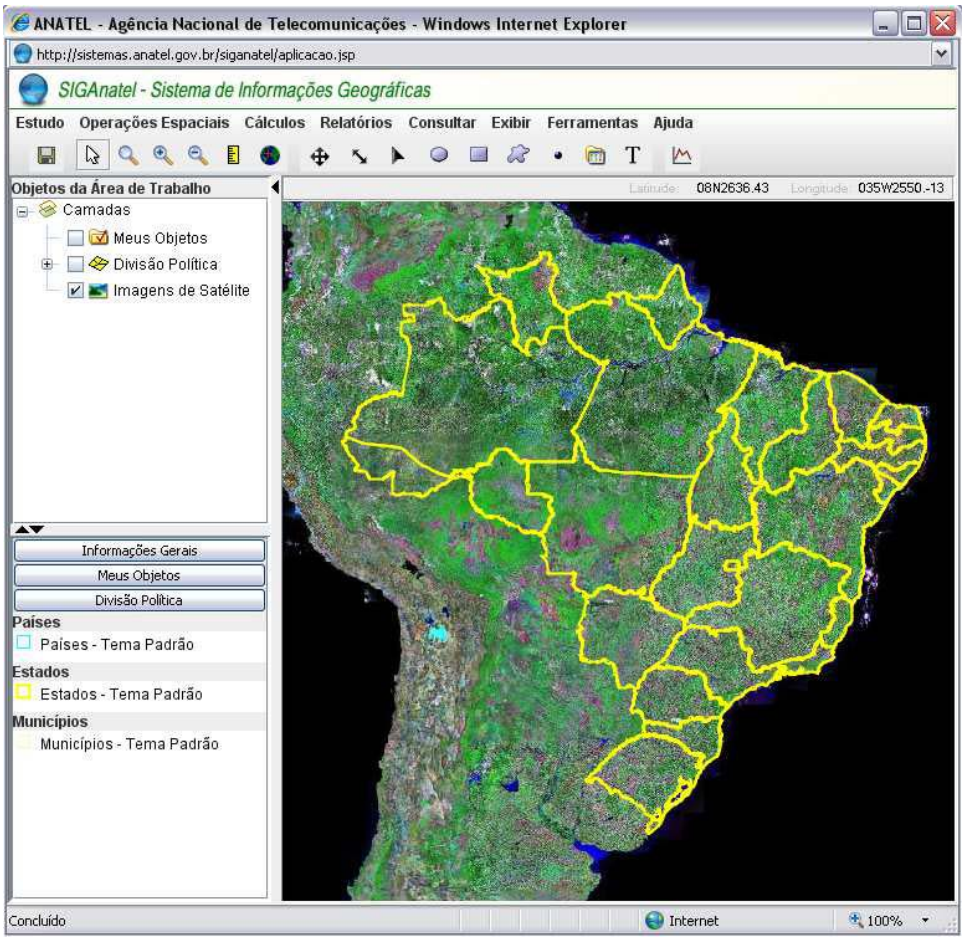


Figura 13: *Layout* do Sistema Siganatel.

A ferramenta SIGANATEL permite estudos de viabilidade técnica para a inclusão de novos canais e para a alteração dos canais previstos nos Planos Básicos de Distribuição de Frequências de Televisão em VHF e UHF (PBTV), de Retransmissão de Televisão em VHF e UHF (PBRTV), de canais de Televisão Digital

(PBTVD), de Televisão por Assinatura em UHF (PBTVA) e de Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada (PBFM) (TELECOMUNICACOES, 2006).

Entre as funcionalidades da ferramenta SIGANATEL destaca-se, por exemplo, a visualização de mapas com divisões políticas do Brasil e da América Latina, incluindo imagens de satélite e perfil de terreno. Esta ferramenta acessa o banco de dados da ANATEL, em tempo real, buscando informações técnicas dos canais dos Planos Básicos, realizando o cálculo dos parâmetros necessários para o estudo de viabilidade, tais como: distância ortodrômica, ângulo de azimute, nível médio de radial (NMR), contorno protegido e contorno interferente. A ferramenta SIGANATEL utiliza as curvas de intensidade de campo apresentadas na Recomendação ITU-R P.1546, que apresenta um método de previsões ponto-área para serviços terrestres, na faixa de 30-3000 MHz (TELECOMUNICACOES, 2006).

3 Redes Neurais Artificiais

NESTE capítulo, são apresentados os principais tópicos relacionados às Redes Neurais Artificiais (RNA's). Em especial, serão apresentadas a arquitetura do Perceptron e do Perceptron de Múltiplas Camadas (do inglês: *Multi-Layer Perceptron - MLP*), o algoritmo de retropropagação de erro utilizado no treinamento das redes MLP e a utilização das redes MLP como modelos de aproximação de funções.

3.1 Redes Biológica e Artificial

A rede neural biológica é, de forma simplista, composta por inúmeras unidades básicas denominadas de neurônios biológicos, como apresentado na Figura 14. Os dendritos são os dispositivos de entrada, tendo como objetivo conduzir os sinais das extremidades para o corpo celular. No outro lado, encontram-se os axônios, que são os dispositivos de saída. As extremidades do axônio de um neurônio são conectados com os dendritos de outros neurônios através das conexões sinápticas. O neurônio biológico é uma célula que ao ser estimulada em uma entrada gera uma saída que é enviada aos neurônios vizinhos (FAUSETT, 1994).

Uma rede neural artificial é definida por HAYKIN (2001) como um processador maciço e paralelamente distribuído composto por unidades de processamento simples, que têm a tendência de armazenar o conhecimento adquirido. Tais unidades são denominadas de neurônios artificiais. O modelo de *McCulloch-Pitts*, neurônio

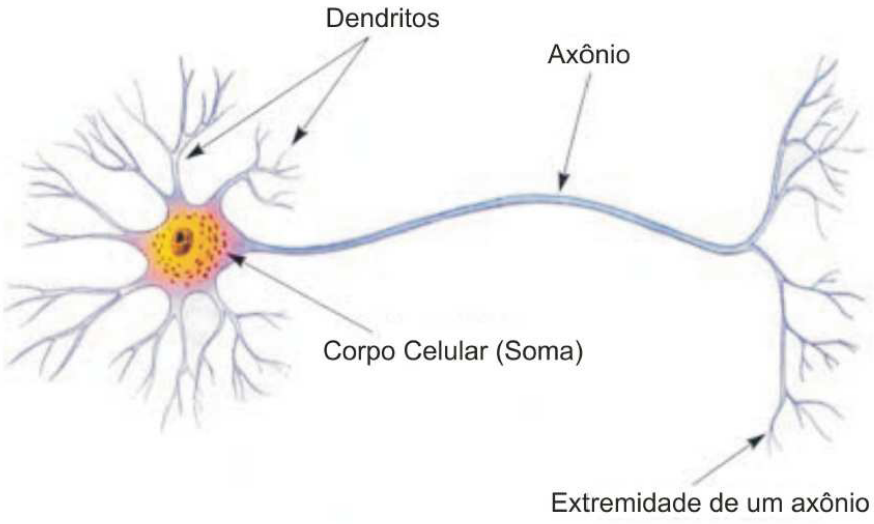


Figura 14: Neurônio Biológico.

artificial não-linear, é apresentado na Figura 15 (HAYKIN, 2001).

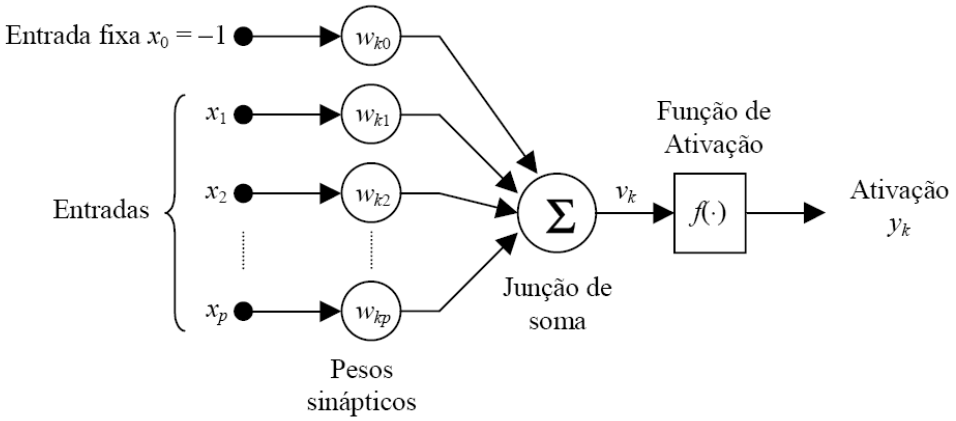


Figura 15: Modelo de Neurônio Artificial.

Os neurônios artificiais são formados por três elementos básicos: um conjunto de conexões de entradas, uma junção de soma e uma função de ativação. Cada entrada é ponderada por um peso sináptico, sendo o sinal x_j na entrada j conectada ao neurônio k e multiplicado pelo peso sináptico w_{kj}. A junção de soma é responsável pela combinação aditiva dos sinais de entrada, ponderados pelos seus

respectivos pesos sinápticos. Por fim, a função de ativação responsável pela restrição da amplitude de saída do neurônio e fornecer a característica não-linear da rede neural. Esse modelo inclui, também, uma *bias*, representada pela entrada fixa, que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação (HAYKIN, 2001).

O modelo de neurônio artificial, apresentado na Figura 15, pode ser descrito pelas seguintes equações (HAYKIN, 2001)

$$v_k = \sum_{j=0}^{p} w_{kj} x_j \tag{3.1}$$

e

$$y_k = f(v_k), \tag{3.2}$$

onde $x_0, x_1, ..., x_p$ são os sinais de entrada, $w_{k0}, w_{k1}, ..., w_{kp}$ são os pesos sinápticos do neurônio k, v_k é o potencial de ativação do neurônio e y_k é a saída do neurônio k (HAYKIN, 2001).

3.2 Tipos de Aprendizados

Uma das características mais importante de uma rede neural é a sua habilidade de aprender e de melhorar o seu desempenho através da aprendizagem, melhoria realizada por um algoritmo de ajuste de pesos sinápticos e *bias* da rede neural. A aprendizagem é definida por HAYKIN (2001) como o processo pelo qual os parâmetros livres, pesos sinápticos e *bias*, de uma rede neural são adaptados através de um processo de estimulação pelo ambiente. Teoricamente, existem duas classes de aprendizagem: a aprendizagem com um "professor"e a aprendizagem sem um "professor"(HAYKIN, 2001).

A aprendizagem com um "professor", conhecida como aprendizagem supervisionada, é caracterizada pela presença de um "professor", cuja função durante o processo de aprendizado é fornecer à rede neural uma resposta desejada a um determinado estímulo apresentado pelo ambiente. A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos da aprendizagem supervisionada (HAYKIN, 2001).

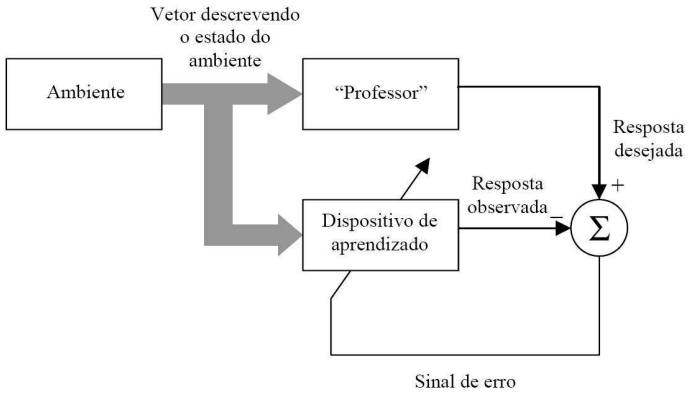


Figura 16: Diagrama de Blocos da Aprendizagem Supervisionada.

Os parâmetros da rede neural são ajustados de acordo com sinal de erro, definido como a diferença entre a resposta desejada (fornecida pelo "professor") e resposta obtida pela rede neural. O algoritmo de retropropagação do erro é um exemplo de aprendizagem supervisionada (HAYKIN, 2001).

A aprendizagem sem um "professor", conhecida como aprendizagem não supervisionada, é caracterizada pela ausência da resposta desejada a um determinado estímulo durante o processo de aprendizagem. Nesse método de aprendizagem são dadas condições para realizar uma medida independente da tarefa de qualidade da representação que a rede neural deve aprender e os parâmetros livres da rede são otimizados em relação a esta medida. A partir do momento em que a rede neural é ajustada com as regularidades estatísticas dos dados de entrada, a rede neural é capaz de formar representações internas para codificar as entradas e formar novas classes. A Figura 17 apresenta o diagrama de blocos de funcionamento da aprendizagem não supervisionda (HAYKIN, 2001).

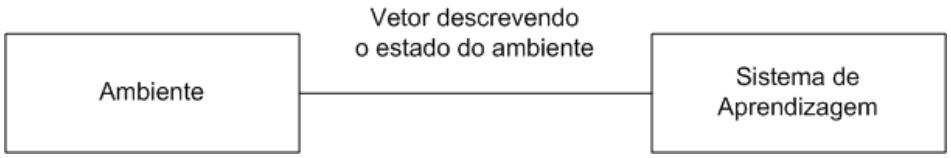


Figura 17: Diagrama de Blocos da Aprendizagem Não Supervisionada.

Na aprendizagem não supervisionada, a rede analisa os conjuntos de dados apresentados, determina algumas propriedades dos conjunto de dados e aprende a refletir estas propriedades na sua saída (HAYKIN, 2001).

3.3 Função de Ativação

A função de ativação $f(.)$ é responsável por definir a ativação de saída do neurônio em termos do seu nível de ativação interna. Pode-se identificar três classes principais de função de ativação (HAYKIN, 2001):

1. Função Sinal (*Heaviside*): Para este tipo de função, apresenta na Figura 18, tem-se

$$f(v) = \begin{cases} 1, & se \quad v > 0 \\ 0, & se \quad v \leq 0 \end{cases} . \tag{3.3}$$

Assim, a ativação de um neurônio k que usa este tipo de função de ativação é dada por

$$f(v) = \begin{cases} 1, & se \quad v_k > 0 \\ 0, & se \quad v_k \leq 0, \end{cases} , \tag{3.4}$$

onde v_k é o nível de ativação interno do neurônio, definido na Equação 3.1. Um neurônio com esta função de ativação é conhecido como modelo de *McCulloch-Pitts*, em homenagem ao trabalho pioneiro de seus idealizadores.

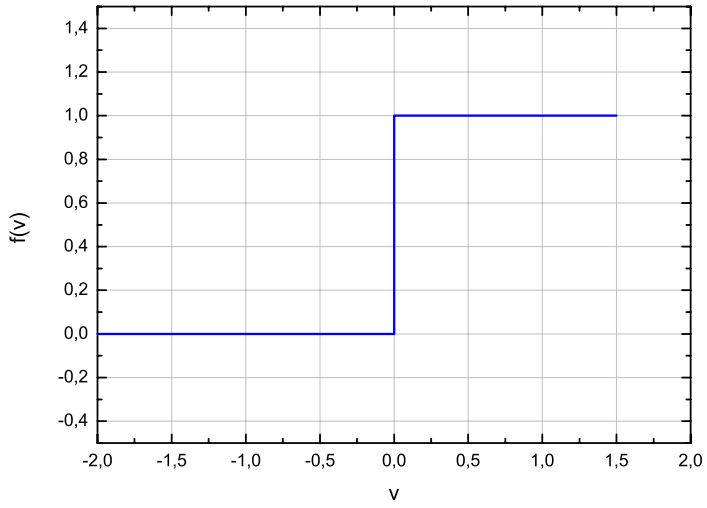


Figura 18: Função de Ativação Sinal ou Função de *Heaviside*.

2. Função Linear por Partes: Para a função linear por partes, apresentada na Figura 19, tem-se

$$f(v) = \begin{cases} 0, & se \quad v \leq -a \\ v + a, & se \quad -a < v > a \\ 1, & se \quad v \geq a \end{cases} . \tag{3.5}$$

   No limite, quando a tende a zero, esta função se aproxima da função sinal.

3. Função Sigmoidal: A função sigmoidal, Figura 20 é a função de ativação mais utilizada em redes neurais artificiais. Ela é definida como uma função monotônica crescente que apresenta propriedades assintóticas e de suavidade. Um exemplo de função sigmoidal é a chamada função logística, definida por

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}}, \tag{3.6}$$

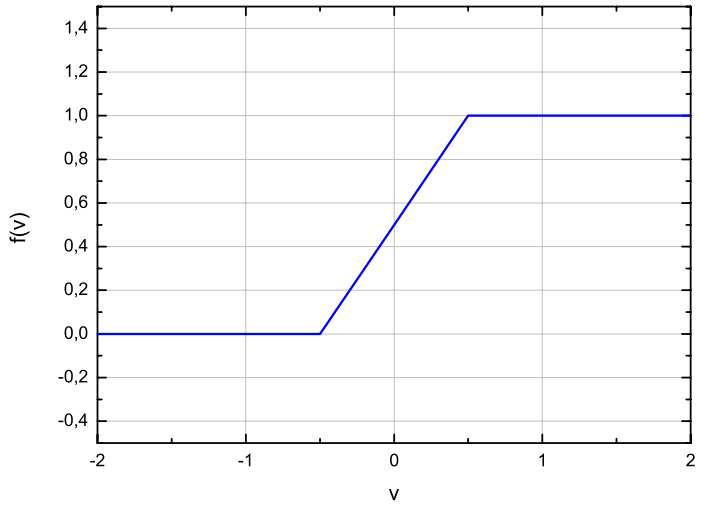


Figura 19: Função de Ativação Linear, com $a = 0{,}5$.

onde a é o parâmetro de inclinação da função sigmoidal. Variando o parâmetro a, obtém-se funções sigmoidais com diferentes inclinações, como apresentado na Figura 20.

Em muitas situações, é desejável ter uma função sigmoidal que varie entre -1 e +1. Nestas situações, uma função comumente empregada é a tangente hiperbólica, definida por

$$f(v) = \frac{1 - e^{-v}}{1 + e^{-v}}. \tag{3.7}$$

3.4 Perceptron

O Perceptron é baseado no neurônio não-linear de *McCulloch-Pitts* apresentado na Seção 3.1. Ele é composto de um combinador linear seguido por limitador

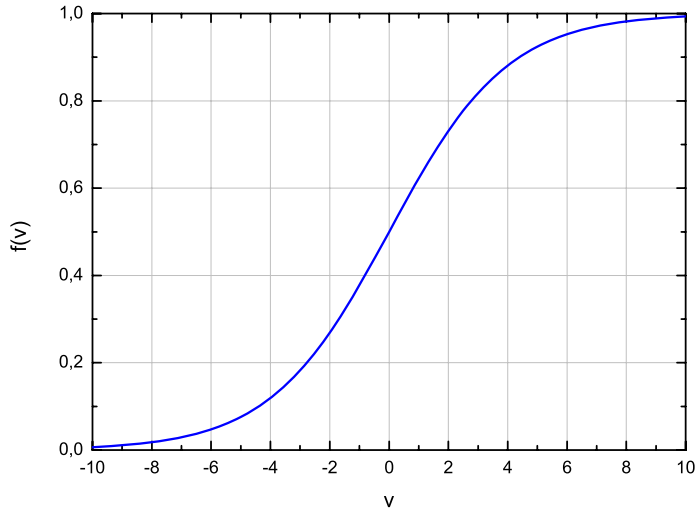


Figura 20: Função de Ativação Sigmoide, com $a = 5$.

abrupto. O fluxo de sinal do Perceptron é apresentado na Figura 21. A junção de soma calcula a combinação aditiva de todas as entradas ponderadas por seus respectivos pesos sinápticos juntamente com a *bias*. O resultado dessa combinação é o campo induzido, definido pela Equação 3.8, que é aplicado ao limitador abrupto que produz uma saída igual a +1 se o campo induzido for positivo e -1 se o campo induzido for negativo (HAYKIN, 2001).

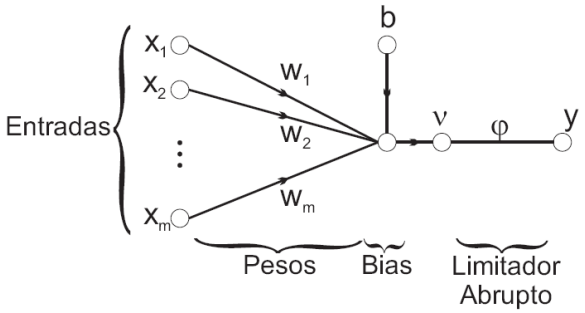


Figura 21: Grafo de Fluxo de Sinal do Perceptron.

$$v = \sum_{i=1}^{m} w_i x_i + b. \tag{3.8}$$

O Perceptron é capaz de classificar corretamente os estímulos de entradas em uma de duas classes, desde que essas classes sejam linearmente separáveis. Os seus pesos sinápticos podem ser adaptados de iteração para iteração utilizando a regra de correção de erro conhecida como o algoritmo de convergência do Perceptron (HAYKIN, 2001).

3.4.1 Teorema de Convergência do Perceptron

Para a explicação do teorema de convergência do Perceptron, serão definidos o vetor de entrada, definido pela Equação 3.9, e o vetor de peso, dado pela Equação 3.10:

$$x(n) = [-1, x_1(n), x_2(n), ..., x_m(n)]^T \tag{3.9}$$

e

$$w(n) = [b(n), w_1(n), w_2(n), ..., w_m(n)]^T, \tag{3.10}$$

onde n representa o passo da iteração de aplicação do algoritmo (HAYKIN, 2001).

Igualando a Equação 3.8 a zero, $w^T x = 0$, para um valor fixo de n e um determinado valor de *bias* $b(n)$, define-se um hiperplano com coordenadas $x_1, x_2, ..., x_m$ denominado de superfície de decisão entre duas classes diferentes de entradas. Para que o Perceptron possa estimar com precisão é necessário que as duas classes sejam linearmente separáveis (Figura 22). A Figura 23 apresenta o caso de classes de padrões não linearmente separáveis (HAYKIN, 2001).

O algoritmo de treinamento do Perceptron baseia-se na adaptação do vetor de pesos. Sua aplicação é condicionada a presença de dois conjuntos de padrões

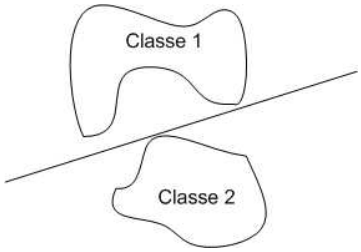


Figura 22: Classes de Padrões Linearmente Separáveis.

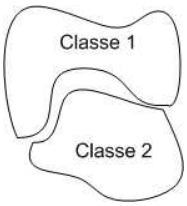


Figura 23: Classes de Padrões Não Linearmente Separáveis.

de treinamento, com valores representativos das duas classes para as quais o Perceptron diferenciará, um conjunto que contenha os valores de entrada, Equação 3.9, e o outro conjunto, Equação 5.1, com os valores de saída para as respectivas entradas (FAUSETT, 1994).

$$d(n) = \begin{cases} +1, & se \quad x(n) \quad \text{pertence} \quad \text{classe} \quad \Im_1 \\ -1, & se \quad x(n) \quad \text{pertence} \quad \text{classe} \quad \Im_2 \end{cases} \tag{3.11}$$

O algoritmo de treinamento do Perceptron é formulado em FAUSETT (1994):

1. Inicialização dos pesos e *bias*. $w(0) = 0$.
   Iniciar a taxa de aprendizagem η, constante positiva menor que a unidade.

2. Ativar as entradas do Perceptron.

3. Calcular a resposta real do Perceptron:

$$v = \sum_{i=1}^{m} w_i x_i + b \tag{3.12}$$

e

$$y = \begin{cases} 1, & v > 0 \\ -1, & v < 0. \end{cases} \tag{3.13}$$

4. Adaptação dos pesos, se ocorrer erro:

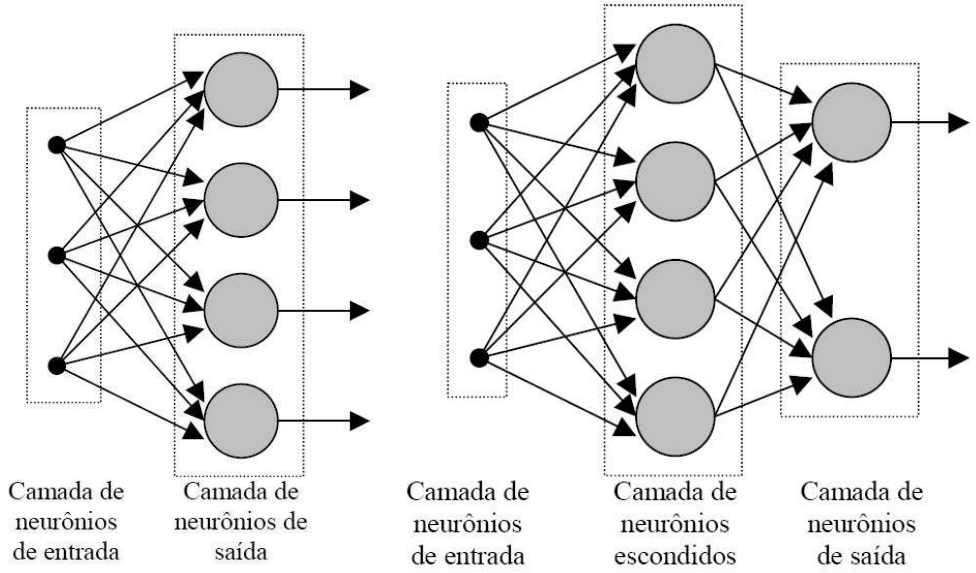
$$w(n+1) = w(n) + \eta[d(n) - y(n)]x(n). \tag{3.14}$$

5. Incrementar o passo de tempo n e retornar ao passo 2.

3.5 Perceptron de Múltiplas Camadas

O Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP), também conhecido como Rede Neural Multicamadas, é uma arquitetura de RNA que tem seus neurônios organizados em duas ou mais camadas de processamento. O modelo de cada neurônio, que compõe a MLP, inclui uma função de ativação não-linear suave, diferenciável em qualquer ponto. A forma mais simples dessa arquitetura de rede consiste de uma camada de entrada e uma camada de saída com apenas um neurônio. A camada de entrada tem como objetivo a distribuição de cada um dos sinais de entrada, sem alterá-los, para todos os neurônios da camada seguinte. A Figura 24(a) apresenta um MLP com uma camada de entrada e uma camada de saída com quatro neurônios escondidos. A Figura 24(b) apresenta um MLP com uma camada de entrada, uma camada escondida com quatro neurônios e uma camada de saída com dois neurônios (FAUSETT, 1994).

O MLP é treinado de forma supervisionada através do algoritmo de retropropagação. O treinamento consiste em duas etapas: propagação do sinal e retropropagação do erro. Na propagação do sinal, um padrão de entrada é aplicado na rede e se propaga camada por camada até produzir uma resposta real na camada de saída. Na retropropagação do erro, a resposta real da rede é comparada



(a) MLP com duas camadas (b) MLP com três camadas

Figura 24: Exemplos de MLP.

com a resposta desejada e os pesos do MLP são ajustados de acordo com o erro encontrado (HAYKIN, 2001).

3.5.1 Algoritmo de Retropropagação do Erro

O treinamento de uma rede utilizando o algoritmo de retropropagação é realizado de forma supervisionada, ou seja, é apresentado a rede um padrão de entrada e também a resposta ideal para esse padrão (HAYKIN, 2001).

Antes de formular o algoritmo de retropropagação, algumas definições serão apresentadas. O sinal de erro na saída do neurônio j na interação n é definido por

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n), \tag{3.15}$$

onde $d_j(n)$ é a resposta desejada para o neurônio j da camada de saída. O valor

instantâneo do erro quadrático para o neurônio j é dado por $\frac{1}{2}e^2$. A soma dos erros quadráticos instantâneo do MLP é definida como

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2}\sum_{j\epsilon S} e_j(n)^2, \tag{3.16}$$

onde S é o conjunto de neurônios da camada de saída. Considerando que N seja o número total de padrões de treinamentos, o erro quadrático médio é dado por

$$\varepsilon_{med} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \varepsilon(n). \tag{3.17}$$

Percebe-se, através da Equação 3.17, que o erro quadrático médio é função de todos os pesos sinápticos pois são os pesos sinápticos que, ao longo do MLP, definem a relação dos dados de entrada com os obtidos na saída. O objetivo do algoritmo de treinamento é minimizar o ε_{med}, ou seja, adaptar os parâmetros livres da RNA (HAYKIN, 2001).

A Figura 25 apresenta um neurônio da camada de saída, alimentado pelas saídas dos neurônios da camada imediatamente anterior. O campo induzido do neurônio j é dado pela Equação 3.18, enquanto que a saída, ou ativação, do neurônio é dada pela Equação 3.19.

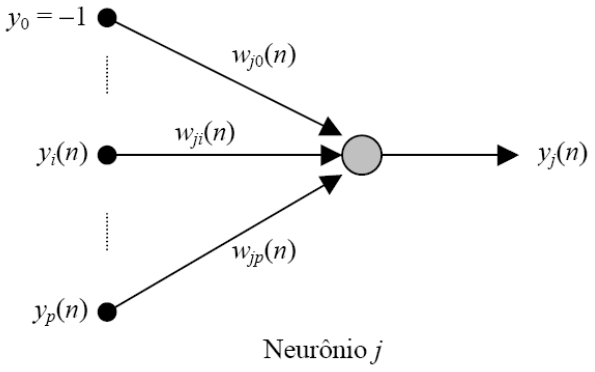


Figura 25: Neurônio de Saída j.

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^{p} w_{ji}(n) y_j(n). \tag{3.18}$$

$$y_j(n) = f_j(v_j(n)). \tag{3.19}$$

Para minimizar o erro quadrático médio deve-se, primeiramente, determinar o gradiente instantâneo $\partial\epsilon(n)/\partial w_{ji}(n)$, encontrado através da regra da cadeia (HAYKIN, 2001)

$$\partial\epsilon(n)/\partial w_{ji}(n) = \frac{\partial\epsilon(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)}. \tag{3.20}$$

Derivando a Equação 3.16 em função de $e_j(n)$ e obtém-se

$$\partial\epsilon(n)/\partial e_j(n) = e_j(n). \tag{3.21}$$

Derivando o erro, dado pela Equação 3.15, em relação a saída e obtém-se

$$\partial e_j(n)/\partial y_j(n) = -1. \tag{3.22}$$

Em seguida, deriva-se a Equação 3.18 em relação a $v_j(n)$, obtém-se

$$\partial y_j(n)/\partial v_j(n) = f_j'(v_j(n)). \tag{3.23}$$

Por fim, deriva-se o campo induzido, Equação 3.18, em relação ao vetor peso

$$\partial v_j(n)/\partial w_{ji}(n) = y_i(n). \tag{3.24}$$

Substituindo as Equações 3.21 a 3.24 no gradiente instantâneo, Equação 3.20, encontra-se

$$\partial\epsilon(n)/\partial w_{ji}(n) = -e_j(n)f'_j(v_j(n))y_i(n). \tag{3.25}$$

Define-se o gradiente local, $\delta_j(n)$, como

$$\delta_j(n) = e_j(n)f'_j(v_j(n)). \tag{3.26}$$

Substituindo o gradiente local na equação do gradiente instantâneo, Equação 3.25, obtém-se

$$\partial\epsilon(n)/\partial w_{ji}(n) = -\delta_j(n)y_i(n). \tag{3.27}$$

O ajuste dos pesos, necessário para minimizar o erro quadrático médio, é realizado utilizando o gradiente instantâneo da seguinte forma

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) - \eta\partial\epsilon(n)/\partial w_{ji}(n), \tag{3.28}$$

onde η é a taxa de aprendizagem do algoritmo de retropropagação. O sinal negativo no gradiente indica o decréscimo do gradiente no vetor de pesos, buscando uma mudança nos valores dos pesos que minimize o valor de ε (HAYKIN, 2001).

A taxa de aprendizagem, η, é um parâmetro que regula o ajuste do peso realizado pelo gradiente instantâneo. Quanto menor for a taxa de aprendizagem, menor serão as variações nos pesos sinápticos de um interação para outra e acarretará demora no processo de treinamento. Para contornar o problema na lentidão do treinamento, pode-se aumentar o valor da taxa de aprendizagem, significando grandes variações nos pesos sinápticos o que pode tornar a rede instável. Um método simples e eficiente para driblar esse problema é inserir um termo denominado momento no algoritmo de retropopagação, conforme Equação 3.29. O momento implicará no aumento indireto do taxa de aprendizagem, evitando o perigo de tornar a rede instável. Ambos os parâmetros, taxa de aprendizagem e

momento, encontram-se na faixa entre 0 e 1 (HAYKIN, 2001).

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) + \alpha \Delta w_{ji}(n-1) - \eta \partial \epsilon(n) / \partial w_{ji}(n), \tag{3.29}$$

onde η é a taxa de aprendizagem e α é o momento.

Baseado nesses conceitos e formulações, o algoritmo de retropropagação é formulado por FAUSETT (1994):

1. Inicialização:
   Os pesos da rede são inicializados aleatoriamente em um intervalo pequeno.

2. Apresentação dos padrões de treinamento:
   Um padrão de treinamento é apresentado à rede para a realização dos passos de propagação e retropropagação.

3. Propagação:
   Cálculo dos campos induzidos e resposta de cada neurônio da rede prosseguindo para frente, camada a camada, até que a resposta real da rede seja calculada. Por fim, calcula-se o sinal erro dado pela Equação 3.15.

4. Retropropagação:
   Calcula-se os gradientes locais, $\delta_j(n)$, para todos os neurônios da rede, de acordo com a seguinte fórmula

   $$\delta_j^{(l)}(n) = \begin{cases} e_j^{(L)}(n) f_j'(v_j^{(L)}(n)), & \text{neurônio } j \text{ da camada de saída } L \\ f_j'(v_j^{(L)}(n)) \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) w_{kj}^{(l+1)}(n), & \text{neurônio } j \text{ na camada oculta } l \end{cases} \tag{3.30}$$

   Ajusta-se os pesos sinápticos utilizando a Equação 3.29.

5. Iteração:
   Repete-se as etapas 2, 3 e 4 até que o critério de parada seja satisfeito.

3.5.2 Critérios de Parada

Não existem critérios bem-definidos para encerrar a operação do algoritmo de retropropagação. No entanto, HAYKIN (2001) sugere alguns critérios, aceitos e utilizados na prática, para o encerramento dos ajustes dos pesos.

O primeiro deles considera que o algoritmo de retropropagação tenha convergido satisfatoriamente quando a norma euclidiana do vetor gradiente atinge um limiar suficientemente pequeno. No entanto, esse critério torna o tempo de aprendizado da rede longo (HAYKIN, 2001).

O segundo critério baseia-se na propriedade de que o erro quadrático médio, ε_{med}, é estacionário em $w = w^*$, onde w^* representa um mínimo local ou global do vetor peso. O critério considera que o algoritmo tenha convergido quando a taxa de variação do erro quadrático médio por época seja suficientemente pequeno. Considera-se suficientemente pequeno valores no intervalo de 0,1 a 1 por cento (HAYKIN, 2001).

3.5.3 Inicialização dos Pesos

A inicialização dos pesos é a primeira etapa a ser realizada na aplicação do algoritmo de retropropagação. Uma inicialização inadequada pode fazer com que o algoritmo de treinamento fique estacionado em um mínimo local ou apresente problemas numéricos. Serão citados dois métodos de inicialização dos pesos comumente utilizados na literatura (FAUSETT, 1994).

O primeiro método consiste em inicializar os pesos aleatoriamente, com distribuição uniforme sobre um pequeno intervalo em torno de zero (FAUSETT, 1994).

O segundo método é conhecido com inicialização de *Nguyen-Widrow* e é baseado na análise geométrica da resposta dos neurônios escondidos para uma única entrada. Os pesos que ligam os neurônios da camada escondida para os neurônios da camada de saída são inicializados com valores aleatórios entre -0,5 e 0,5. A inicia-

lização dos pesos que ligam os neurônios da camada de entrada para os neurônios da camada escondida é realizada por meio da relação dada

$$w_{ij} = \frac{\beta w_{ij}^{a}}{||w_{ij}^{a}||}, \tag{3.31}$$

onde $\beta = 0,7(p)^{1/n}$, w_{ij}^{a} é vetor de pesos com valores aleatórios no intervalo de -0,5 a 0,5, n é o número de unidades de entrada e p é o número de neurônios escondidos (FAUSETT, 1994).

3.5.4 Validação Cruzada

A validação cruzada é uma ferramenta estatística utilizada para auxiliar na escolha de parametrização da rede neural, com o objetivo de tornar a rede bem treinada de modo que aprenda o suficiente sobre o passado para generalizar o futuro (HAYKIN, 2001).

O conjunto de dados disponíveis para o treinamento é dividido em dois subconjuntos: o subconjunto de estimação e o subconjunto de validação. O subconjunto de estimação é utilizado na realização do treinamento da rede, enquanto que, o subconjunto de validação é utilizado para validar o atual estado de treinamento da rede neural e é composto por um número de padrões correspondente de 15% a 20% do número de padrões do subconjunto de estimação. O grande diferencial desse método é que a validação da rede é realizada com um conjunto de padrões diferente dos que foram utilizados para o treinamento da mesma (HAYKIN, 2001).

O subconjunto de padrões de treinamento é utilizado para treinar a rede na maneira usual para um número específico de épocas. Após esse período, os pesos (incluindo o valor da *bias*) são fixados e a rede passa operar no sentido de propagação com os padrões do subconjunto de validade. Terminada a validação, caso o critério de parada não seja alcançado, o treinamento recomeça (HAYKIN, 2001).

A Figura 26 apresenta duas curvas de aprendizagem de estimação. Uma das

curvas é referente ao subconjunto de treinamento e decresce monotonamente à medida com que o número de épocas aumenta. A segunda curva é relativa ao subconjunto de validação e decresce monotonamente para um mínimo e retorna a crescer com o aumento do número de épocas utilizadas no treinamento.

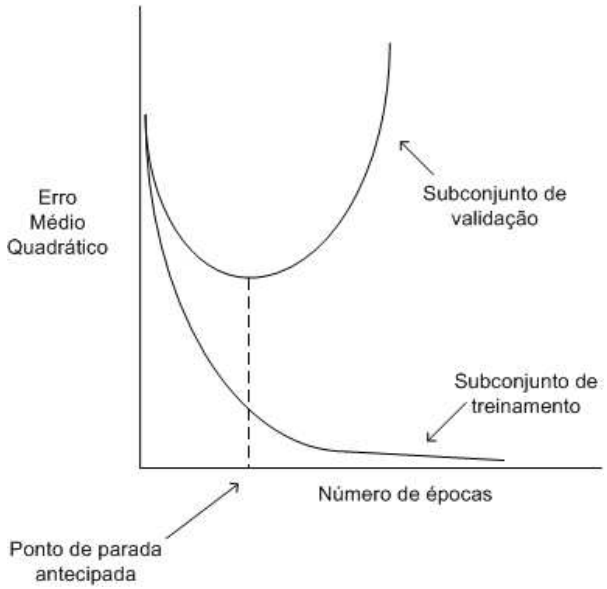


Figura 26: Curvas de Aprendizagem.

Na validação cruzada, o critério de parada está condicionado a curva de aprendizagem do subconjunto de validação. Como apresenta a Figura 26, essa curva decresce para um mínimo e em seguida começa a crescer, ou seja, o erro da rede decresce até um mínimo e em seguida volta a crescer. A parada antecipada ocorrerá quando a curva de aprendizagem de validação voltar a crescer, ou seja, o erro decairá para um mínimo global e começará a crescer, nesse instante ocorrerá a parada antecipada (HAYKIN, 2001).

3.5.5 Aproximação de Funções

Nesta seção será apresentada uma importante propriedade do Perceptron com uma única camada de neurônios escondidos: seu poder de aproximação de funções

(ZUBEN, 1996).

O problema geral da aproximação afirma que se Ω é uma região compacta do $\Re^m$, g: $\Omega \subset \Re^m \rightarrow \Re^r$ é uma função desconhecida que associa a cada vetor de variáveis de entrada $x \in \Omega$ um vetor de saídas $s \in \Re^r$. Se g é uma função limitada, então a imagem de Ω sob g é também uma região compacta $g[\Omega] \subset \Re^r$ definida na forma (ZUBEN, 1996)

$$g[\Omega] = g(x) : x \in \Omega. \tag{3.32}$$

Elementos de um conjunto multidimensional de pares de vetores de entrada-saída $(x_l, s_l), l = 1, ..., N$, são gerados considerando-se que os vetores de entrada x_l estão distribuídos na região compacta $\Omega \subset \Re^m$ de acordo com uma função densidade de probabilidade fixa $d_p : \Omega \in \Re^m \rightarrow [0, 1]$, e que os vetores de saída s_l assumam valores finitos produzidos pelo mapeamento definido pela função g na forma

$$s_l = g(x_l) + \varepsilon_l, \quad l = 1, ..., N, \tag{3.33}$$

onde $\varepsilon_l \in \Re^r$ é um vetor de erro aditivo, composto por variáveis aleatórias de média zero e variância fixa, geralmente refletindo a dependência de $s_l, l = 1, ..., N$ em relação a quantidades não-controláveis (por exemplo, ruído no processo de amostragem) e não observáveis (por exemplo, variáveis não-mensuráveis) (ZUBEN, 1996).

Dado o conjunto de dados amostrados $(x_l, s_l)_{l=1}^N$ definidos no espaço $\Omega X \Re^r$, o problema de aproximação envolve a determinação de um modelo de aproximação $g' : \Omega \rightarrow \Re^r$ que corresponda à melhor aproximação para o mapeamento realizado pela função $g : \Omega \rightarrow \Re^r$ (ZUBEN, 1996).

Considere agora uma rede neural multicamada com uma única camada escondida, como a apresentada na Figura 27. Nesta figura temos uma rede com m

entradas, n neurônios na camada escondida e r neurônios na camada de saída. Considera-se que todos os neurônios da camada intermediária possuem a mesma função de ativação $f(.)$. Assume-se também que $f(.)$ é uma função contínua, limitada e monotônica crescente. Os neurônios da camada de saída possuem como função de ativação a função identidade (ZUBEN, 1996).

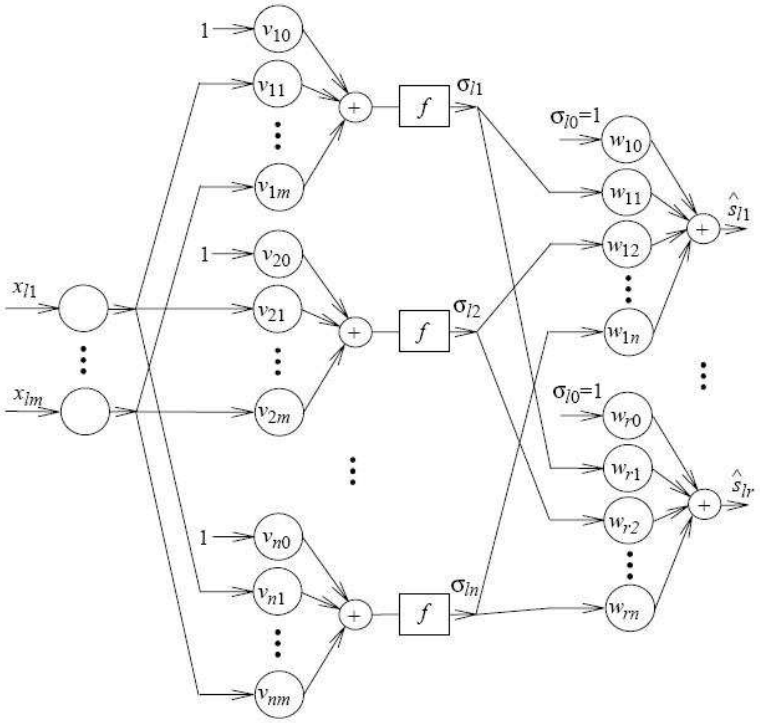


Figura 27: Rede neural com uma camada escondida.

Redes neurais com uma única camada escondida são consideradas estruturas poderosas para aproximação de funções. Note que o aprendizado de um mapeamento entrada-saída a partir do conjunto de dados amostrados $(x_l, s_l)_{l=1}^{N}$ pode ser considerado como a síntese de um modelo de aproximação $g'(.)$ para a função desconhecida $g(.)$. Podemos então usar uma rede neural com uma camada intermediária e treinamento supervisionado para obter estimativas s' para todo $x \in \Omega$ tal que $s' = g'(x)$. Da Figura 27, obtém-se que a ativação do k-ésimo neurônio de saída $(k = 1, ..., r)$ é dada por

$$s'_k = w_{k0} + \sum_{j=1}^{n}[w_{kj} f(\sum_{i=1}^{m} v_{ji} x_i + v_{j0})], \tag{3.34}$$

onde $v_{ji}, i \neq 0$ representa o peso sináptico que conecta a i-ésima entrada ao j-ésimo neurônio escondido; v_{j0} é a polarização do j-ésimo neurônio escondido; $w_{kj}, j \neq 0$ representa o peso que conecta o j-ésimo neurônio escondido ao k-ésimo neurônio de saída e w_{k0} representa a polarização do k-ésimo neurônio de saída (HAYKIN, 2001) (Teorema 3.1).

Redes neurais com uma camada intermediária, como as descritas aqui, apresentam uma propriedade que as tornam atraentes para uso em problemas de aproximação de funções: a capacidade de aproximação universal. Portanto, o teorema da aproximação universal é declarado como

Teorema 3.1 - Seja $C[\Omega]$ o espaço de funções contínuas em Ω, onde Ω é uma região compacta. Se $g : \Omega \subset \Re^m \rightarrow \Re^r$ é tal que $g \in C[\Omega]$, então, para qualquer $\xi > 0$, existem n, V e W tal que

$$dist(g(x), RN^{[n]}(V, W, x)) < \xi \quad \forall x \in \Omega, \tag{3.35}$$

onde o operador $dist(.,.)$ mede a distância entre a função g a ser aproximada e a função $RN^{[n]}(V, W, x)$ produzida pela rede neural. Note que n é o número de neurônios na camada intermediária.

O Teorema 3.1 garante a existência de um MLP com uma única camada escondida e com um número adequado de neurônios na camada escondida, que seja capaz de aproximar com precisão ξ uma função contínua desconhecida, dado um conjunto de amostras para treinamento $(x_l, s_l)_{l=1}^{N}$. Observa-se, entretanto, que o teorema não afirma que uma única camada escondida é ótima no sentido de tempo de aprendizado ou facilidade de implementação e também não indica como obter a taxa de aprendizagem e os vetores pesos, sendo apenas um resultado existencial (ZUBEN, 1996).

3.5.6 Validação da RNA Utilizada neste Trabalho

Com o objetivo de validar a implementação do algoritmo de retropropagação do erro para o Perceptron com uma única camada escondida, implementação que será utilizada na proposta deste trabalho, aplicou-se a propriedade de aproximação de funções, descrita na seção anterior, nos modelos de propagação espaço livre, log-distância e Hata, apresentados na Seção 2.3.

A arquitetura da rede neural constitui-se de uma entrada, que fornece o valor da distância e uma saída que representa o valor da intensidade do sinal. Os dados que compõem o conjunto de entrada foram normalizados para o intervalo de $-0,9$ e $0,9$, correspondendo a $0,2$ e 30 km, respectivamente. Enquanto que, os dados da saída foram normalizados para o intervalo de $-0,9$ e $0,9$, correspondendo a -100 dBm e -10 dBm, respectivamente.

Para a determinação dos parâmetros livres da rede neural que melhor estime a forma de onda desejada, determinou-se trinta padrões de treinamento, de forma a representar com fidelidade a forma de onda para cada modelo de propagação, e cem padrões para a validação da estimação da RNA. Utilizou-se um momento igual a $0,7$ e com um número máximo de 200.000 épocas. Realizou-se o treinamento da RNA para doze combinações de taxa de aprendizagem e número de neurônios na camada escondida, descritos na Tabela 5.

A Tabela 6 apresenta os valores dos erros quadráticos médios (EQM) para o treinamento e para a validação de estimação da rede neural. Para o modelo de propagação espaço livre obteve-se como melhor configuração para aproximação da função, uma rede neural com cinco neurônios na camada escondida e uma rede treinada com uma taxa de aprendizagem igual a $0,5$, pois foi a configuração que obteve menor erro quadrático médio.

A Figura 28 apresenta duas curvas para o modelo de propagação espaço livre. A primeira, curva de linha preta e cheia, representa a forma de onda original obtida através dos cálculos matemáticos fornecidos pelo modelo. A segunda, curva

Tabela 5: Configurações de Treinamento do Perceptron com uma Única Camada Escondida.

Taxa de Aprendizado	Número de Neurônios da Camada Escondida
0,01	1 3 5 7
0,1	1 3 5 7
0,5	1 3 5 7

Tabela 6: Resultados Obtidos no Treinamento para Aproximação da Função do Modelo de Propagação Espaço Livre.

Taxa de Aprendizado	Número de Neurônios da Camada Escondida	EQM Treinamento	EQM na Validação
0,01	1	0,145347	8,42432571
	3	0,019889	1,84276134
	5	0,019067	1,79979092
	7	0,018866	1,78361982
0,1	1	0,155019	7,57900996
	3	0,001911	0,634979
	5	0,001881	0,63121662
	7	0,001878	0,63040911
0,5	1	0,269394	12,84983874
	3	0,000361	0,34767171
	5	0,000235	0,32345455
	7	0,000308	0,33763686

vermelha e pontilhada, é a forma de onda aproximada pela rede neural. Nota-se que a diferença entre ambas é mínima, validando o algoritmo de retropropagação do erro implementado utilizado.

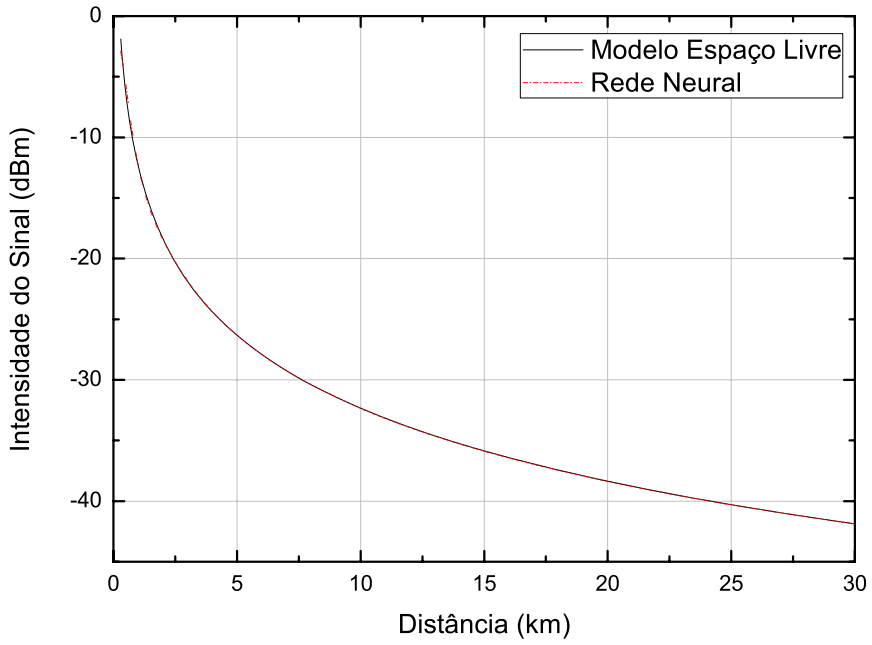


Figura 28: Aproximação de Função para o Modelo Espaço Livre.

Resultados similares foram obtidos para os modelos de propagação Log-Distância e Hata. A Tabela 7 fornece os valores obtidos no treinamento para a aproximação da função do modelo de propagação Log-Distância. Neste caso, conclui-se que a utilização de cinco neurônios na camada escondida e treinamento da rede neural com taxa de aprendizagem igual $0,5$ constitui a melhor configuração para o modelo de propagação Log-Distância.

A Figura 29 apresenta a curva original e a curva para a aproximação da função através de uma rede neural para o modelo de propagação Log-Distância.

A Tabela 8 fornece os resultados obtidos no treinamento da rede neural para

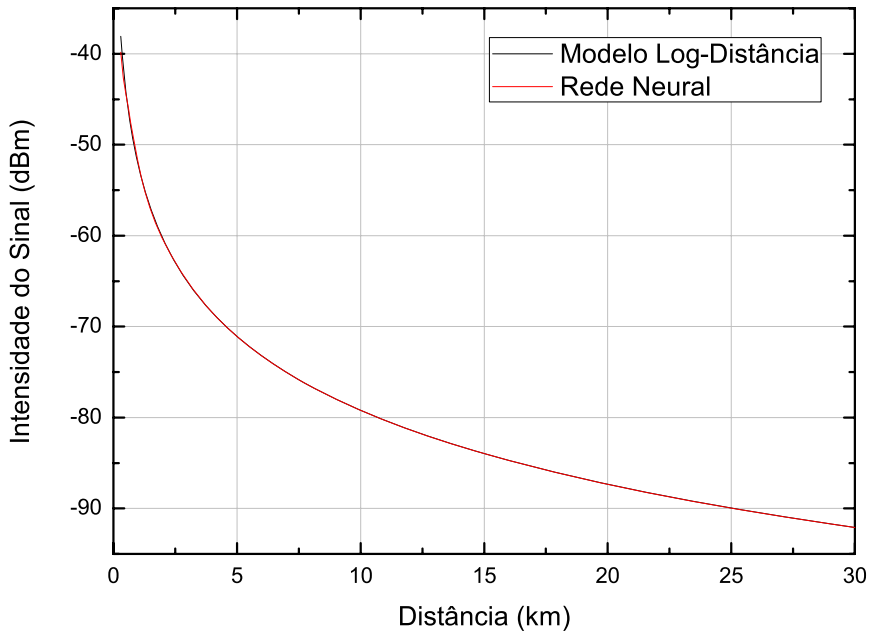


Figura 29: Aproximação de Função para o Modelo Log-Distância.

o modelo de propagação Hata. A melhor configuração da rede neural obtida foi uma rede com cinco neurônios na camada escondida e um treinamento com taxa de aprendizagem igual $0,5$. A Figura 30 apresenta as curvas para o modelo matemático e para a aproximação realizada pela rede neural.

Tabela 7: Resultados Obtidos no Treinamento para Aproximação da Função do Modelo Log-Distância.

Taxa de Aprendizado	Número de Neurônios da Camada Escondida	EQM Treinamento	EQM na Validação
0,01	1	0,118051	4,16331695
	3	0,013433	0,62278491
	5	0,013649	0,63930865
	7	0,013308	0,62187338
0,1	1	0,127435	3,90724401
	3	0,001677	0,18202349
	5	0,001564	0,17601122
	7	0,001592	0,17747352
0,5	1	0,230544	7,12457761
	3	0,000364	0,08857672
	5	0,000253	0,08011568
	7	0,000257	0,08017694

Tabela 8: Resultados Obtidos no Treinamento para Aproximação da Função do Modelo de Propagação Hata.

Taxa de Aprendizado	Número de Neurônios da Camada Escondida	EQM Treinamento	EQM Validação
0,01	1	0,1308123	6,233737723
	3	0,0179001	1,757864063
	5	0,0171603	1,723122981
	7	0,0169794	1,707384827
0,1	1	0,1395171	4,425758895
	3	0,0017199	0,640255537
	5	0,0016929	0,636457485
	7	0,0016902	0,635637448
0,5	1	0,2424546	6,616857127
	3	0,0003249	0,351152137
	5	0,0002543	0,33878934
	7	0,0002772	0,341014589

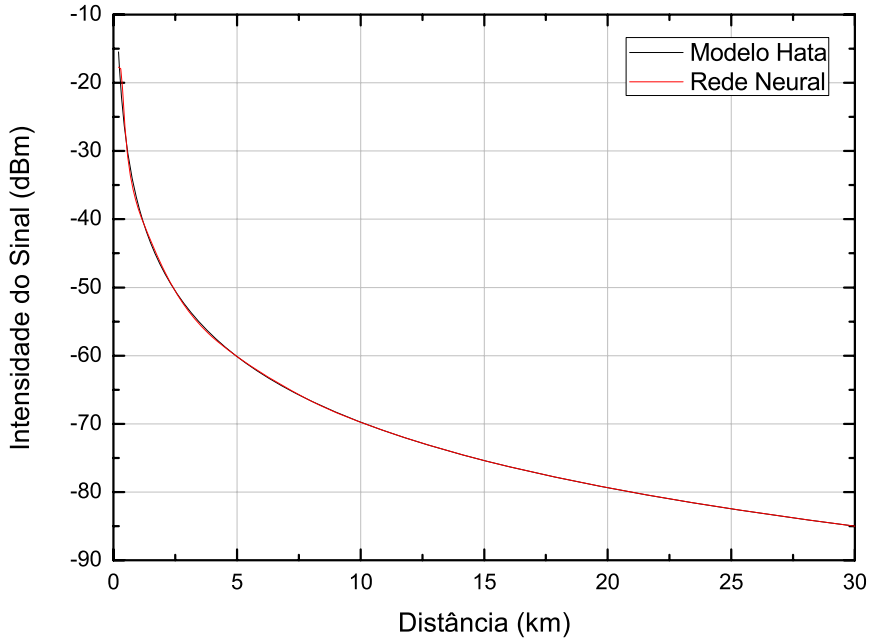


Figura 30: Aproximação de Função para o Modelo Hata para Grandes Cidades.

4 Sistema ISDB-Tb

O Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre (SBTVD), formalmente criado em novembro de 2006 com os objetivos de auxiliar e estimular a criação e melhoria do sistema de transmissão e recepção de sons e imagens digitais, é composto por empresas e entidades dos setores de radiofusão, de indústria de transmissão e recepção, acadêmico e da indústria de software. O trabalho realizado pelo Fórum é dividido em quatro módulos: Módulo de Mercado, Módulo Técnico, Módulo de Propriedade Intelectual e Módulo de Promoção (TERRESTRE, 2008).

O Módulo de Mercado identifica as necessidades, desejos e oportunidades do mercado. O Módulo Técnico é responsável pelos esforços relativos às especificações técnicas do SBTVD, as atividades de pesquisa e desenvolvimento e a harmonização das especificações técnicas com outras entidades nacionais e internacionais. O Módulo de Propriedade Intelectual busca soluções relativas à propriedade intelectual, definindo políticas e práticas. Por fim, o Módulo de Promoção tem com objetivo principal a promoção da tecnologia e seus benefícios. Neste capítulo, serão apresentados alguns resultados obtidos pelo Módulo Técnico, por meio das normas técnicas referentes aos sistemas de transmissão e recepção (TERRESTRE, 2008).

As especificações do sistema brasileiro de TV digital procuram tornar o sistema economicamente viável e coerente com os padrões internacionais existentes. As normas referem-se a distribuição e recepção dos sistemas de TV digital, a alta definição (do inglês: *high-definition television* - HDTV), definição padrão (do inglês: *standard-definition television* - SDTV), mobilidade, portabilidade, serviços

de dados e interatividade. Incluem também os subsistemas de transmissão, codificação de áudio e vídeo, multiplexação, segurança, receptores, *middleware* e canal de interatividade conforme estabelecido na Comissão de Estudos Especial de TV digital da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (TERRESTRE, 2008).

Até o presente momento, a Comissão de Estudo Especial de Televisão Digital (ABNT/CEE), parte integrante da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), elaborou quatorze normas técnicas referentes a implantação da televisão digital no Brasil. A ABNT/CEE adotou como padrão o "Serviço Integrado de Transmissão Digital Terrestre Brasileiro"(ISDB-Tb), adaptado do padrão japonês ISDB-T (do inglês: *Integrated Services Digital Broadcasting Terestrial* para a realidade do Brasil) (TERRESTRE, 2008).

A norma NBR 15601 (Televisão digital terrestre: Sistema de Transmissão) especifica o sistema de transmissão do SBTVD, engloba o sistema de codificação de canal e modulação, descrevendo o processamento do sinal no modulador e os processos de demodulação na recepção (TÉCNICAS, 2008a).

A codificação de vídeo, áudio e multiplexação do SBTVD é especificado pela norma NBR 15602 que é dividida em três partes. A NBR 15602-1 define a codificação de vídeo em alta definição, resolução padrão e resolução reduzida. Esta norma ainda inclui os parâmetros para os sinais na entrada do codificador e as restrições ao processo de codificação aplicáveis ao SBTVD. A NBR 15602-2, segunda parte da norma NBR 15602, especifica os parâmetros para os sinais de áudio e o sistema de codificação/decodificação de som utilizado no SBTVD. Por fim, a terceira parte da norma NBR 15602, NBR 15602-3, determina a forma de multiplexação de sinais para a radiodifusão digital dos mecanismos de transporte e da estrutura de dados aplicáveis ao SBTVD (TÉCNICAS, 2008b).

A norma NBR 15603, composta por três partes, é responsável pela especificação dos métodos de multiplexação e serviços de informação (SI) (TÉCNICAS, 2008f). A NBR 15603-1, primeira parte da norma NBR 15603, especifica as tabelas de SI para os sinais de radiodifusão que fazem parte da transmissão de dados do

SBTVD. A segunda parte, NBR 15603-2, estabelece as tabelas básicas de informação de serviço e a estrutura de dados e definições da informação básica de SI. Finalizando, a terceira parte da norma, NBR 15603-3, especifica em detalhes a estrutura para a construção das informações básicas relacionadas ao SI do SBTVD (TÉCNICAS, 2008e).

Os receptores para treze segmentos (do inglês: *full-seg*) e para um segmento (do inglês: *one-seg*) tem suas especificações estabelecidas pela Norma NBR 15604 (Televisão Digital Terrestre - Receptores), que determinou o conjunto de funcionalidades essenciais requeridas dos dispositivos de recepção destinados a receber sinais na modalidade fixa, móvel ou portátil (TÉCNICAS, 2008h).

A NBR 15605 (Televisão Digital Terrestre: Tópicos de Segurança), com o objetivo de proteger os direitos autorais, especifica uma sinalização de controle de cópias de conteúdo e a sua interpretação à plataforma do receptor, utilizando de ferramentas internacionais de proteção de conteúdo para ganhos de interoperabilidade e custo. Ela se divide em três partes: controle de cópias (a única com publicação até o momento), mecanismos de segurança para aplicativos e extensões. A primeira parte, NBR 15605-1, define os mecanismos e regras para o controle de cópias através de ferramentas internacionais de proteção aplicadas às saídas de vídeo, áudio e dados dos receptores do SBTVD (TÉCNICAS, 2008i).

No intuito de padronizar a codificação de dados e a transmissão dos mesmos no SBTVD, a ABNT/CEE elaborou a Norma NBR 15606 (Televisão Digital Terrestre: Codificação de dados e especificações de transmissão para radiodifusão digital) que contém cinco partes: Codificação de dados; Ginga-NCL para receptores fixos e móveis - Linguagem de aplicação XML para codificação de aplicações; Especificações de transmissão de dados; Ginga-J - Ambiente para a execução de aplicações procedurais, ainda não publicada; e Ginga-NCL para receptores portáteis - Linguagem de Aplicação XML para codificação de aplicações (TÉCNICAS, 2008j) (TÉCNICAS, 2008k) (TÉCNICAS, 2008l) (TÉCNICAS, 2008m).

A interatividade do SBTVD é normalizada pela NBR 15607 (Televisão digital

terrestre - Canal de Interatividade) que é dividida em três partes: Protocolos, interfaces físicas e interfaces de *software* (única publicação até o momento); Dispositivo externos; Interface de configuração para as tecnologias de acesso. A NBR 15607-1, primeira parte da NBR 15607, descreve os protocolos, interfaces físicas e interfaces de *software* para tecnologia de comunicações específicas a serem empregadas no canal de interatividade (TÉCNICAS, 2008n).

4.1 Sistema de Transmissão

No sistema de transmissão, uma ou mais entradas contendo feixe de dados devem ser remultiplexadas para criar um único feixe a ser submetido a codificação de canal múltiplo, de acordo com a intenção do serviço, para então ser enviado como um sinal OFDM (do inglês: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) comum. A Figura 31 apresenta, de forma simples, o sistema de transmissão do sinal de TV digital (TÉCNICAS, 2008a).

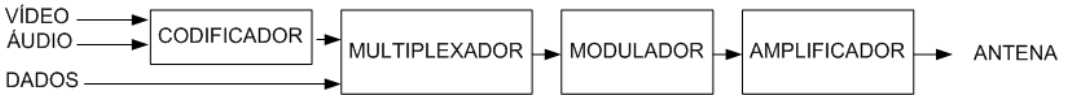


Figura 31: Visão geral do sistema de transmissão.

A codificação de canal deve ocorrer em unidades de segmento OFDM, sendo um único canal de televisão utilizado para serviço de recepção fixa, móvel e portátil (transmissão hierárquica). Esse método possibilita que serviços especiais, como a transmissão hierárquica, sejam implementados. O serviço de transmissão hierárquica permite que diferentes receptores recebam e processem o sinal, gerando imagem e som de acordo com suas características. Assim, a transmissão hierárquica permite que os dados sejam codificados e modulados de formas diferentes. Cada camada hierárquica consiste de um ou mais segmentos OFDM, podendo ser definidas até três camadas hierárquicas (TÉCNICAS, 2008a).

O espectro de radiodifusão de televisão digital consiste de treze blocos OFDM

sucessivos, cada segmento ocupando 1/14 da largura do canal de televisão. O serviço portátil, recepção parcial, consiste em uma das camadas do serviço de televisão que é submetido ao processo de entrelaçamento de frequência e localiza-se no segmento central do espectro (TÉCNICAS, 2008a).

Para garantir a adequada recepção frente às variações do canal, consequência do efeito *Doppler* do sinal de recepção móvel, existe três configurações de espaçamento de portadores OFDM que são identificados como modos do sistema. O espaçamento deve ser de 4 kHz, 2kHz ou 1 kHz para os modos 1, 2 e 3, respectivamente. A Tabela 9 fornece os parâmetros do sistema de transmissão adotados no padrão ISDB-Tb (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1 Processo de Transmissão

A Figura 32 apresenta, de maneira simplificada, a estrutura do sistema de transmissão do ISDB-Tb. O bloco remultiplexação do feixe de transporte (do inglês: *Transport Stream* - TS), alimentado por um multiplexador externo MPEG2 (do inglês: *Moving Picture Experts Group*), tem a função de arranjar o TSP (do inglês: *Transport Stream Packet*) para o processamento do sinal. Em seguida, aplica-se o código *Reed-Solomon* (RS) para que o TS seja convertido em TS comum (TÉCNICAS, 2008a).

Nas configurações em que houver transmissão hierárquica, o TS é dividido em múltiplas camadas hierárquicas de acordo com cada informação da camada, sendo fixado o número máximo de três camadas hierárquicas (ou blocos paralelos de processador) (TÉCNICAS, 2008a).

Em cada bloco paralelo de processador, uma série de etapas são realizadas como entrelaçamento, codificação e modulação. A diferença de atraso no tempo gerado no entrelaçamento é corrigida antes do ajuste de sincronismo das camadas hierárquicas. Após o processamento paralelo, as camadas são combinadas para a execução do entrelaçamento no tempo e na frequência, assegurando uma melhoria

Tabela 9: Parâmetros do sistema de transmissão.

Parâmetros		Valores
1	Número de segmentos	13
2	Largura do segmento	6000/14 = 428,57 KHz
3	Banda ocupada	5,575 MHz (modo 1) 5,573 MHz (modo 2) 5,572 MHz (modo 3)
4	Número de Portadoras	1405 (modo 1) 2809 (modo 2) 5617 (modo 3)
5	Método de Modulação	DQPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM
6	Duração dos símbolos ativos	$252\mu s$ (modo 1) $504\mu s$ (modo 2) $1008\mu s$ (modo 3)
7	Espaçamento de portadoras	3,968 kHz (modo 1) 1,984 kHz (modo 2) 0,992 kHz (modo 3)
8	Duração do intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 da duração dos símbolos ativos 63; 31,5; 15,75; 7,875 μs (modo 1) 126; 63; 31,5; 15,75 μs (modo 2) 252; 126; 63; 31,5 μs (modo 3)
9	Duração total dos símbolos	315; 283,5; 267,75; 259,875 μs (modo 1) 628; 565; 533,5; 517,75 μs (modo 2) 1260; 1134; 1071; 1039,5 μs (modo 3)
10	Duração do quadro de transmissão	204 símbolos OFDM
11	Codificação de canal	Código convolucional, taxa = 1/2 com 64 estados Puncionado para taxas 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
12	Entrelaçamento interno	Entrelaçamento em frequência Entrelaçamento *interleaving* 0;380;760; 1520 símbolos (modo 1) 0; 190; 380; 760 símbolos (modo 2) 0; 95; 190; 380 símbolos (modo 3)

na correção de erro contra a variação de intensidade de campo e a interferência de multipercurso na recepção móvel (TÉCNICAS, 2008a).

Para assegurar a correta decodificação e demodulação por parte do receptor, são usados múltiplos parâmetros de configuração e um sinal TMCC (do inglês: *Transmission and Multiplexing Configuration Control*) que junto com o sinal de programa e sinal-piloto de sincronização formam um quadro OFDM. Por fim, todos os sinais são convertidos em sinal de transmissão OFDM pelo processo de IFFT (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.1 Remultiplexador do Feixe de Transporte

O bloco do remultiplexador do feixe de transporte tem a função de formatar o fluxo de dados MPEG2, vindo de um multiplexador externo para entregá-lo ao codificador externo. O processo é iniciado com a quebra do fluxo de entrada em unidades elementares de 188 *bytes* de tamanho que recebem mais 16 *bytes* nulos, resultando em 204 *bytes* denominados pacotes de feixe de transporte de transmissão (TSPs). A taxa de geração de pacotes MPEG2 TSP é 4 vezes maior que a frequência IFFT para que o sincronismo seja mantido (TÉCNICAS, 2008a).

A saída do remultiplexador de feixe de transporte é formada por um fluxo de quadros multiplex, que por sua vez são compostos por TSPs de transmissão. O tamanho do quadro multiplex não é fixo e é determinado pela configuração do modo de transmissão e da taxa do intervalo de guarda IG. A Tabela 10 fornece a lista de parâmetros e tamanho em TSPs dos quadros que compõe o fluxo multiplex.

Tabela 10: Número de TSP Transmitidos Dentro de um Quadro Multiplex

Modo	Taxa do Intervalo de guarda	Taxa do Intervalo de guarda	Taxa do Intervalo de guarda	Taxa do Intervalo de guarda
	1/4	1/8	1/16	1/32
Modo 1	1280	1152	1088	1056
Modo 2	2560	2304	2176	2112
Modo 3	5120	4608	4352	4224

O quadro multiplex é também composto por TSPs nulos, chamados de TSP_{NULL}. Estes TSPs não contém nenhuma informação, servindo apenas como enxerto do quadro multiplex. Este procedimento é executado quando o número de TSPs requisitado por determinada camada é superior ao número de TSPs disponibilizados pelo remultiplexador do feixe de transporte. Os TSP_{NULL} são devidamente identificados e excluídos no processo de recepção (TÉCNICAS, 2008a).

A Figura 33 apresenta um quadro multiplex para configuração de modo de transmissão 1 e intervalo de guarda IG = 1/8 (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.2 Codificação Externa

O esquema de codificação externo utilizado pelo ISDB-Tb é o *Reed- Solomon* (RS) e tem a função de proteger os dados no início do processo de codificação de canal. O RS (204,188) é empregado em cada TSP de transmissão que chega ao codificador, independente da camada que este pertença. Este tipo de codificação é conhecido como esquema encurtado, e é assim denominado pois 255 *bytes* são gerados a partir dos 188 disponibilizados no início do codificador, e destes 204 são processados e 51 são eliminados. Este esquema de codificação faz uso do Campo de Galois (2^8), com o polinômio $p(x)$ dado por

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1, \tag{4.1}$$

que gera o código RS encurtado descrito pelo polinômio g(x) formulado na Equação 4.2

$$g(x) = (x - \lambda^0)(x - \lambda^1)(x - \lambda^2)...(x - \lambda^{15}), \tag{4.2}$$

onde $\lambda = 02_{HEX}$ (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.3 Divisão do feixe de transporte em camada hierárquica

O bloco divisor tem a função de separar os diferentes fluxos de acordo com as camadas que pertencem. Assim, dependendo da configuração inicial, os TSPs de transmissão são direcionados para uma, duas ou no máximo três camadas (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.4 Dispersor de Energia

O processo de dispersão de energia acontece independentemente em cada uma das camadas e tem a função de evitar que uma sequência de sucessivos zeros ou uns sejam transmitidos, garantindo uma transição binária adequada. Este processo é executado a partir de uma operação binária XOR, entre os dados da camada em referência e uma sequência pseudo-aleatória, gerada pelo registrador de deslocamento apresentado na Figura 34.

O polinômio gerador deste registrador é apresentado na Equação 4.3, sendo o seu estado inicial '1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 ' organizado na ordem ascendente de *bits* da esquerda para a direita (TÉCNICAS, 2008a).

$$G(x) = X^{15} + X^{14} + 1. \tag{4.3}$$

4.1.1.5 Ajuste de Atraso

A transmissão hierárquica tem como característica a configuração de diferentes parâmetros nas camadas de forma independente. Estas diferentes configurações implicam em dados com tamanhos distintos e provocam diferentes atrasos no receptor. Para evitar diferentes atrasos entre as camadas, um esquema de ajuste de atraso é executado no processo de transmissão dos dados. O ajuste é feito pela inserção de diferentes atrasos nas camadas de acordo com o esquema de modulação que será empregado, bem como pela taxa do código que o codificador interno

utilizará (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.6 Entrelaçador de *byte*

O entrelaçador de *byte* (do inglês: *Byte Interleaving*) tem a função de misturar os *bytes* formadores do TSP de transmissão. Cada TSP de transmissão é composto por 204 *bytes* e são misturados como forma de combate dos possíveis problemas causado pelo canal de transmissão (TÉCNICAS, 2008a).

Este é o primeiro entrelaçador que atua nos dados antes de serem transmitidos, e como o dispersor de energia, funciona independentemente por camada. Ele é composto por 12 braços, sendo que cada um insere um atraso diferente, pois possuem *buffers* de diferentes tamanhos, com excessão do primeiro braço que não introduz atraso (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.7 Codificação Interna

A codificação interna é executada por um codificador convolucional com puncionamento, ou seja, com descarte de *bit* selecionado segundo um critério definido. O diagrama do codificador, apresentado na Figura 35, contém o código-mãe de profundidade k igual a 7 e uma taxa de codificação igual a 1/2 utilizado na codificação interna. Caracteriza-se por um código polinomial gerador com $G1 = 171_{oct}$ e $G2 = 133_{oct}$ (TÉCNICAS, 2008a).

A taxa de codificação selecionável do código interno é a sequência do sinal de transmissão puncionado no tempo e deve estar de acordo com a Tabela 11, tendo o padrão apresentado na tabela iniciado pelo quadro de sincronização para assegurar a confiabilidade do receptor (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.8 Modulação

No processo de modulação da portadora, o sinal de entrada deve ser entrelaçado *bit* a *bit* e mapeado por meio de um esquema específico para cada camada hierárquica. O processo de entrelaçamento consiste em embaralhar os *bits* de acordo com a regra de cada mapa de modulação utilizada. Como consequência, um atraso de *bits* é introduzido em cada segmento, variando de acordo com o mapeamento. Esta diferença é corrigida com a inserção de um atraso de correção, apresentado na Tabela 12 (onde N representa o número de segmentos utilizados em cada camada), resultando em um atraso total uniforme igual a 2 símbolos OFDM. O sistema ISDB-Tb é configurado para utilizar quatro tipos distintos de modulação (DQPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM), descritos na Seção 2.1 do Capítulo 2 (TÉCNICAS, 2008a).

Como o sistema ISDB-Tb trabalha com diferentes método de modulação é necessário que a energia dos símbolos das diferentes constelações seja normalizada. Para tanto, a Tabela 13 fornece o fator de normalização, para cada tipo de modulação, que deve ser multiplicado pela energia de cada símbolo da constelação. Como resultado, a potência média do símbolo OFDM torna-se igual a 1, independente do esquema de modulação utilizado (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.9 Combinação de Camadas Hierárquicas

Os sinais das diferentes camadas hierárquicas, após a codificação de canal e modulação de portadoras para os parâmetros específicos de cada camada hierárquica, são combinados para a criação de um único feixe para posterior entrelaçamento no tempo e na frequência. A Figura 36 apresenta a forma com que as camadas hierárquicas são combinadas para a formação do único feixe (TÉCNICAS, 2008a).

Na configuração do combinador o parâmetro n_c assume o valor de 96, 192 ou 384 nos modos de transmissão 1, 2 ou 3 respectivamente, enquanto que, N_s corresponde aos blocos das camadas hierárquicas com os segmentos (TÉCNICAS,

Tabela 11: Taxa do Código Interno e Sequência do Sinal de Transmissão.

Taxa de Codificação	Curva de Puncionamento	Sequência de Transmissão do Sinal
1/2	X:1 Y:1	X1,Y1
2/3	X:10 Y:11	X1,Y1,Y2
3/4	X:101 Y:110	X1,Y1,Y2,X3
5/6	X:10101 Y:11010	X1,Y1,Y2,X3,Y4,X5
7/8	X:1000101 Y:1111010	X1,Y1,Y2,Y3,Y4,X5,Y6,X7

Tabela 12: Ajuste do Valor de Atraso Requerido como Resultado do *Bit Interleaving*, em Número de *Bits*.

Modulação de portadora	Modo 1	Modo 2	Modo 3
DQPSK/QPSK	384*(N-240)	768*(N-240)	1536*(N-240)
16-QAM	768*(N-480)	1536*(N-480)	3072*(N-480)
64-QAM	1152*(N-720)	2304*(N-720)	4608*(N-720)

Tabela 13: Normalização do Nível de Modulação.

Esquema de Modulação da Portadora	Fator de Normalização
DQPSK deslocado π /4	$z/\sqrt{2}$
QPSK	$z/\sqrt{2}$
16-QAM	$z/\sqrt{10}$
64-QAM	$z/\sqrt{42}$

2008a).

4.1.1.10 Entrelaçador de Tempo

Após a combinação das diferentes camadas hierárquicas, o entrelaçamento no tempo (do inglês: *time interleaving*) insere atrasos entre as portadoras de segmentos, de forma que uma sequência de dados não seja transmitida em um mesmo momento. O objetivo desse entrelaçamento é o aumento da robustez contra o desvanecimento através de aleatoriedade de símbolo de dados após a modulação. A Figura 37 apresenta a configuração da seção de entrelaçamento no tempo do sistema ISDB-Tb (TÉCNICAS, 2008a).

O comprimento do *time interleaving* é especificado como "*l*" para cada camada hierárquica. As diferenças de atrasos no tempo devem ser corrigidas no lado da transmissão, usando o número do símbolo ou atraso apropriado de acordo com as Tabela 14 à 16 de modo que o número total de atraso de transmissão e recepção seja múltiplo do número de quadros. Este ajuste deve ser realizado antes do entrelaçamento no tempo (TÉCNICAS, 2008a).

Tabela 14: Valores do Comprimento do *Time Interleaving* e Ajuste de Atrasos para o Modo 1.

Modo 1		
Comprimento (l)	Número de Símbolos de Ajuste do atraso	Número de Quadros atrasados na Transmissão e Recepção
0	0	0
4	28	2
8	56	4
16	112	8

Tabela 15: Valores do Comprimento do *Time Interleaving* e Ajuste de Atrasos para o Modo 2.

Modo 2		
Comprimento (l)	Número de Símbolos de Ajuste do atraso	Número de Quadros atrasados na Transmissão e Recepção
0	0	0
2	14	1
4	28	2
8	56	4

Tabela 16: Valores do Comprimento do *Time Interleaving* e Ajuste de Atrasos para o Modo 3.

Modo 3		
Comprimento (l)	Número de Símbolos de Ajuste do atraso	Número de Quadros atrasados na Transmissão e Recepção
0	0	0
1	109	1
2	14	1
4	28	8

4.1.1.11 Entrelaçamento em Frequência

No entrelaçamento em frequência, durante a divisão dos segmentos, os números 0 a 12 do segmento de dados devem ser designados sequencialmente para a porção da recepção parcial, modulação diferencial e coerente. A Figura 38 apresenta a configuração da seção de entrelaçamento em frequência. O objetivo desse procedimento é tornar o sinal robusto frente os efeitos destrutivos do canal de transmissão através do embaralhamento das portadoras de um mesmo segmento (TÉCNICAS, 2008a).

O entrelaçamento dentro do segmento é realizado através da rotação de portadoras dentro do segmento, seguido pela aleatorização de portadoras dentro de segmentos. O entrelaçamento entre segmentos é realizado em dois ou mais segmentos se pertencerem ao mesmo tipo de porção modulada, mesmo que pertençam a diferentes camadas hierárquicas. Como exceção, o entrelaçamento de segmentos não é realizado para a porção de recepção parcial, devido a característica do receptor de utilizar somente esse segmento para a recepção (TÉCNICAS, 2008a).

4.1.1.12 Estrutura de Quadro OFDM

Nesta etapa, ocorre o ordenamento dos símbolos em quadros OFDM para posterior transmissão. Existem duas estruturas básicas de quadro, uma para modulação diferencial e outra para modulação síncrona, que são selecionadas a partir do tipo de modulação empregada na camada e recebem ainda os canais de sinal piloto CP (do inglês: *Continual Pilot*), de controle TMCC (do inglês: *Transmission and Multiplexing Configuration Control*) e auxiliares AC (do inglês: *Auxiliary Channel*) (TÉCNICAS, 2008a).

A configuração do segmento OFDM para modulação diferencial deve estar de acordo com a configuração apresentada pela Figura 39. Os sinais CP, TMCC e AC devem representar os pilotos contínuos, sinal para a informação de controle de transporte e o sinal de extensão para informação adicional de transporte. Os sinais de controle são inseridos nos quadro de forma particular entre os segmen-

tos, o TMCC e AC são inseridos em portadoras distintas para diminuir os efeitos causados pelo multipercurso. Enquanto que, o CP é transmitido na portadora mais a esquerda do espectro, ou seja, a portadora com menor frequência, pois sua função é proporcionar ao receptor uma referência para execução da demodulação diferencial, trabalhando como SP (do inglês: *Scattered Pilot*) de modulação síncrona do segmento (TÉCNICAS, 2008a).

Para a modulação síncrona, a configuração do segmento OFDM é apresentada na Figura 40 para o modo 1 de transmissão. As portadoras SP são inseridas no quadro síncrono a cada 12 portadoras, e a cada 4 símbolos dentro da mesma portadora, garantindo o sincronismo das informações no receptor. O arranjo das portadoras AC1 é o mesmo para a modulação diferencial, enquanto que as portadoras AC2 estão disponíveis somente para a modulação diferencial. O arranjo das portadoras TMCC e AC1 é aleatório, relativo à direção da frequência, com o intuito de reduzir o impacto de atenuações de canal causadas por multipercursos (TÉCNICAS, 2008a).

O sinal piloto espalhado, SP, é um sinal BPSK e é formado por uma sequência pseudo-aleatória gerada por um registrador de deslocamento de polinômio gerador definido pela Equação 4.4. Sua função é garantir o sincronismo para os segmentos que utilizam modulação síncrona. O sinal piloto contínuo (CP), assim como o SP, é um sinal BPSK com a função de referência nos segmentos que utilizam modulação diferencial, sendo constante ao longo do tempo (TÉCNICAS, 2008a).

$$G(x) = X^{11} + X^9 + 1. \tag{4.4}$$

O TMCC é um sinal piloto modulado pelo esquema DBPSK. Sua função é carregar as informações de configuração de cada segmento, de modo que o receptor saiba como demodular e decodificar as informações (TÉCNICAS, 2008a).

Os canais AC são responsáveis por transportar qualquer tipo de informação adicional. Para tal, utilizam um esquema de modulação DBPSK. Estão disponíveis

dois canais AC para transmissão de informações adicionais: AC1 e AC2. O AC1, presente em todos os segmentos, independente do tipo de modulação empregada, e o AC2, presente apenas nos segmentos que utilizam modulação diferencial (TÉCNICAS, 2008a).

Após a determinação do quadro OFDM é realizada a Inversa da Transformada Rápida de Fourier (IFFT, do inglês: *Inverse Fast Fourier Transformation*). Finalizando o processo de transmissão, o intervalo de guarda é inserido no começo do símbolo efetivo, como apresentado na Figura 41 (TÉCNICAS, 2008a).

4.2 Receptores

Nesta seção serão apresentados alguns requisitos dos dispositivos de recepção de televisão digital para treze segmentos (*full-seg*) e para um segmento (*one-seg*) fornecidos pela NBR 15604. A receptor básico para televisão digital é composto por uma antena de recepção terrestre, um decodificador de recepção integrado (do inglês: *Integrated Receiver Decoder* - IRD) e um cabo de conexão entre a antena e o receptor, conforme apresentado pela Figura 42. Na recepção fixa há pelo menos dois modelos de IRD diferentes: o conversor digital (do inglês: *set-top box* - STB) que é conectado ao dispositivo televisor através de cabos ou qualquer outro meio, e o IRD integrado que é integrado ao dispositivo televisor dispensando interfaces de saídas dos sinais de áudio e vídeo (TÉCNICAS, 2008h).

4.2.0.13 Especificações das unidades receptoras

Serão fornecidas algumas especificações técnicas relativas as unidades receptoras, normalizada por meio da NBR 15604, que são de interesse para a proposta desse trabalho. Inicia-se pela descrição da antena de recepção, largura da faixa do canal, frequência da portadora central dos canais destinados ao sinal digital e finalizando com a descrição da sensibilidade dos dispositivos receptores (TÉCNICAS, 2008h).

A antena de recepção de sinais de televisão digital terrestre deve possibilitar a recepção de sinais localizados nos canais de VHF de 07 a 13 e os canais de UHF de 14 a 69 para os receptores do tipo fixo e móvel *full-seg*, e pelos menos os canais de UHF de 14 a 69 para os receptores portáteis *one-seg*. Podendo ter sua polarização na horizontal ou vertical (TÉCNICAS, 2008h).

A largura da faixa do canal para os dispositivos fixos e móveis de recepção *full-seg* é de $5,7$ MHz, enquanto que, para os dispositivos portáteis de recepção *one-seg* possuem uma largura de faixa de $0,43$ MHz. As frequências das portadoras centrais de cada canal de televisão digital são apresentadas na Tabela 17 para canais de VHF e Tabela 18 para canais de UHF para a recepção *full-seg*, sendo na recepção *one-seg* as frequências das portadoras centrais apresentadas na Tabela 18 (TÉCNICAS, 2008h).

Tabela 17: Frequência dos Canais VHF Alto.

Número do Canal	Frequência da portadora central (MHz)
07	177 + 1/7
08	183 + 1/7
09	189 + 1/7
10	195 + 1/7
11	201 + 1/7
12	207 + 1/7
13	213 + 1/7

A norma NBR 15604 determina que a sensibilidade dos receptores *full-seg* e *one-seg* deve satisfazer o nível mínimo de entrada do sinal de antena de -77 dBm ou inferior e nível de sinal igual ou superior a -20 dBm (TÉCNICAS, 2008h).

Tabela 18: Frequência dos Canais UHF.

Número do Canal	Frequência da portadora central (MHz)	Número do Canal	Frequência da portadora central (MHz)
14	437 + 1/7	42	641 + 1/7
15	479 + 1/7	43	647 + 1/7
16	485 + 1/7	44	653 + 1/7
17	491 + 1/7	45	659 + 1/7
18	497 + 1/7	46	665 + 1/7
19	503 + 1/7	47	671 + 1/7
20	509 + 1/7	48	677 + 1/7
21	515 + 1/7	49	683 + 1/7
22	521 + 1/7	50	689 + 1/7
23	527 + 1/7	51	695 + 1/7
24	533 + 1/7	52	701 + 1/7
25	539 + 1/7	53	707 + 1/7
26	545 + 1/7	54	713 + 1/7
27	551 + 1/7	55	719 + 1/7
28	557 + 1/7	56	725 + 1/7
29	563 + 1/7	57	731 + 1/7
30	569 + 1/7	58	737 + 1/7
31	575 + 1/7	59	743 + 1/7
32	581 + 1/7	60	749 + 1/7
33	587 + 1/7	61	755 + 1/7
34	593 + 1/7	62	761 + 1/7
35	599 + 1/7	63	767 + 1/7
36	605 + 1/7	64	773 + 1/7
37	Não Aplicável	65	779 + 1/7
38	617 + 1/7	66	785 + 1/7
39	623 + 1/7	67	791 + 1/7
40	629 + 1/7	68	797 + 1/7
41	635 + 1/7	69	803 + 1/7

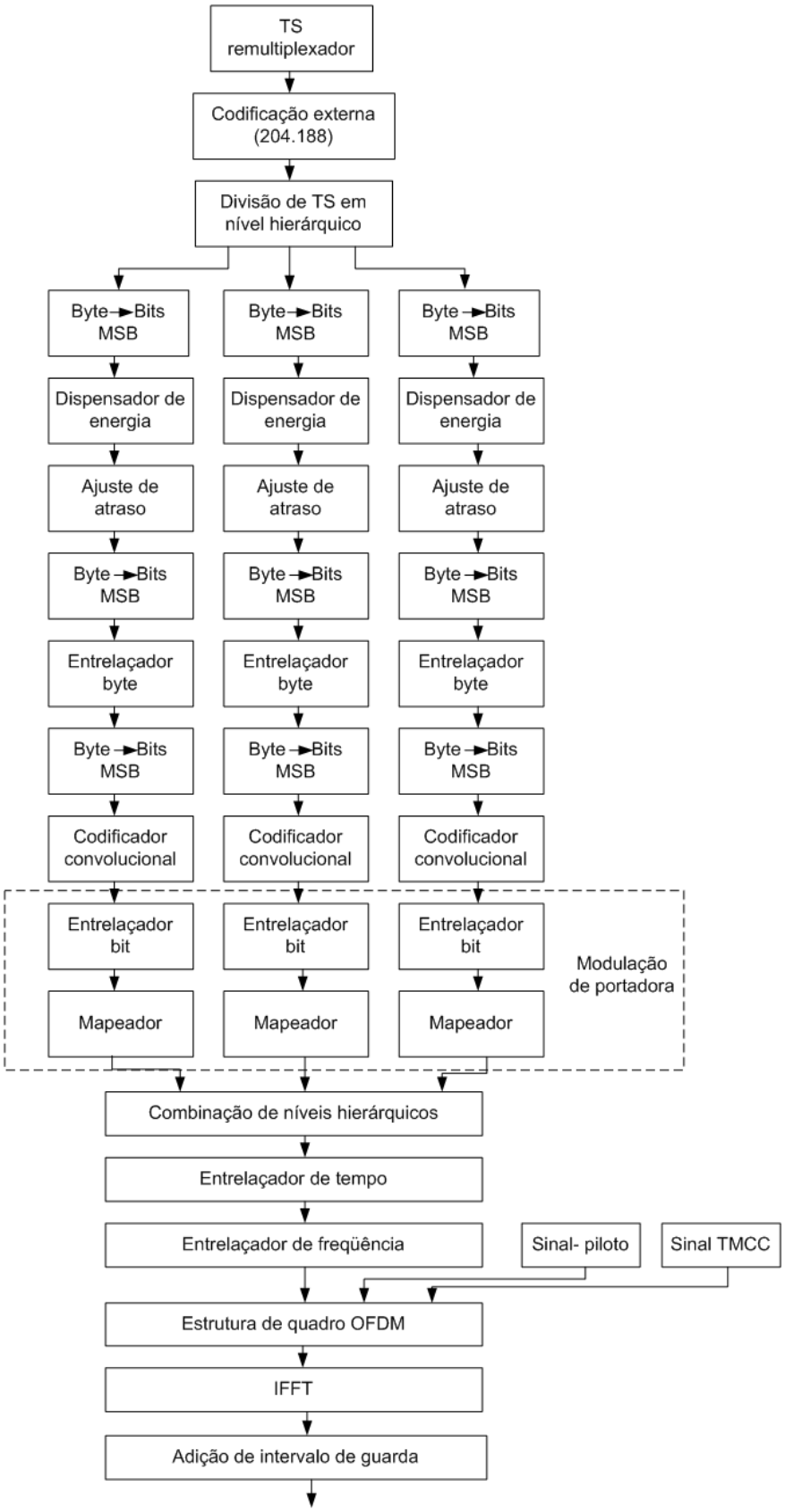


Figura 32: Diagrama em Blocos da Codificação de Canal.

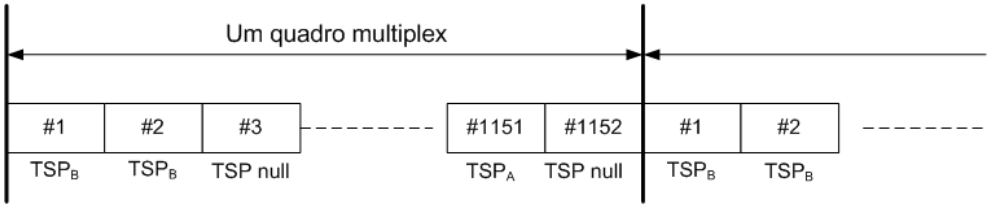


Figura 33: Exemplo de Feixe de Transporte Remultiplexado (Modo 1, Intervalo de Guarda 1/8).

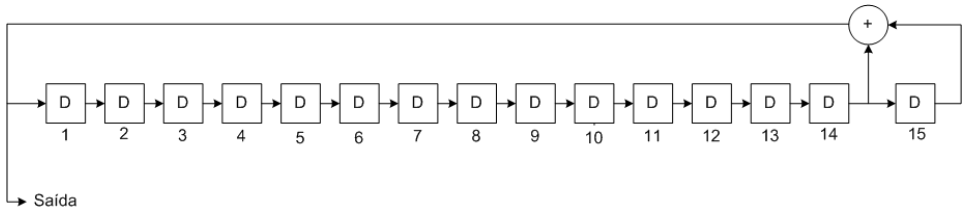


Figura 34: Gerador do Polinômio da Sequência Pseudo-aleatória.

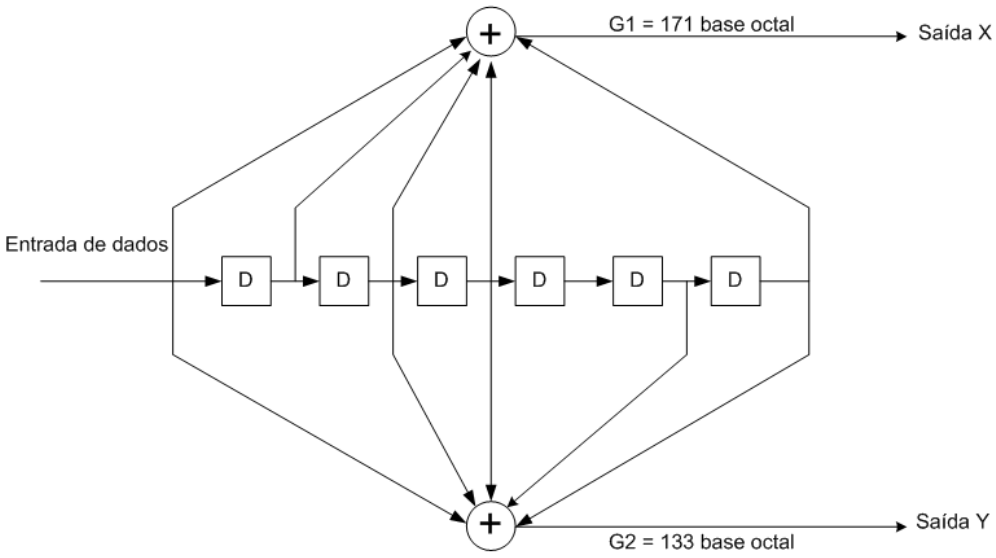


Figura 35: Circuito de codificação do código convolucional com profundidade k de 7 e taxa de codificação 1/2.

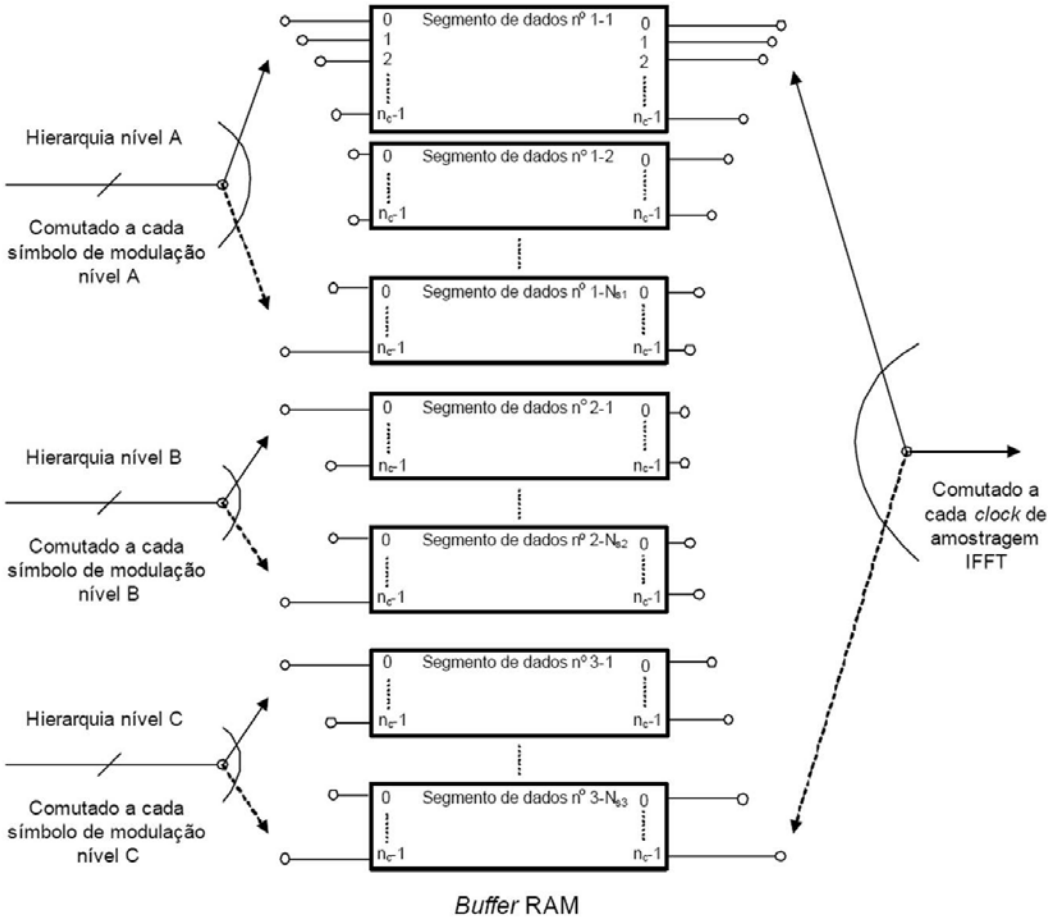


Figura 36: Configuração do combinador de camadas.

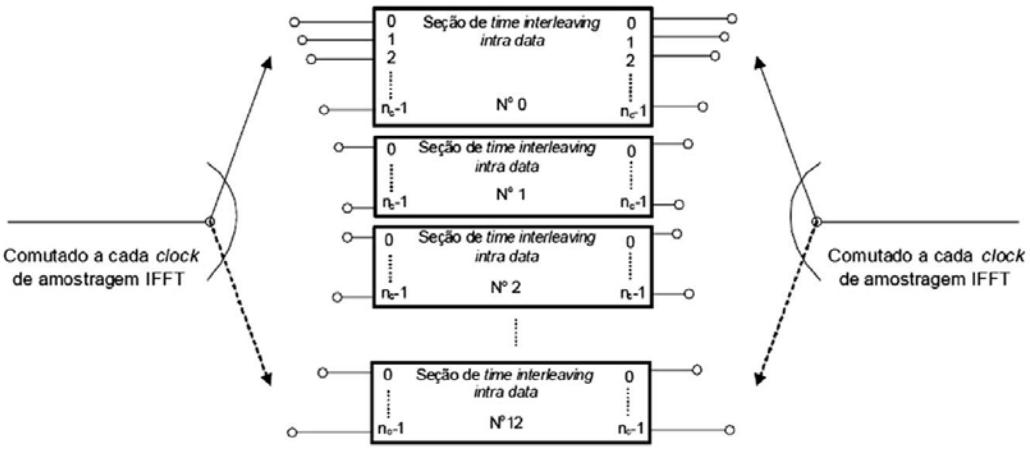


Figura 37: Configuração da Seção de Entrelaçamento no Tempo.

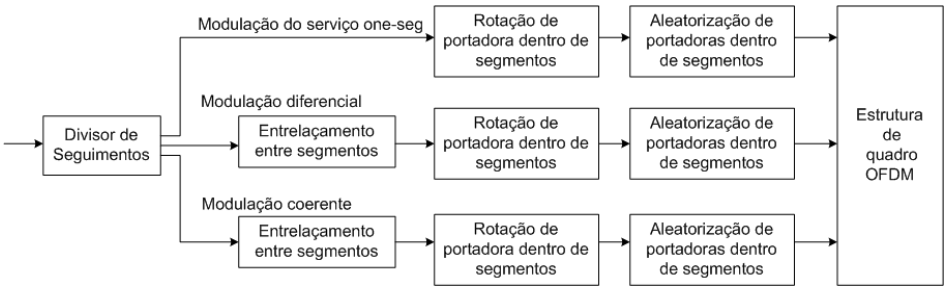


Figura 38: Configuração da Seção de Entrelaçamento em Frequência.

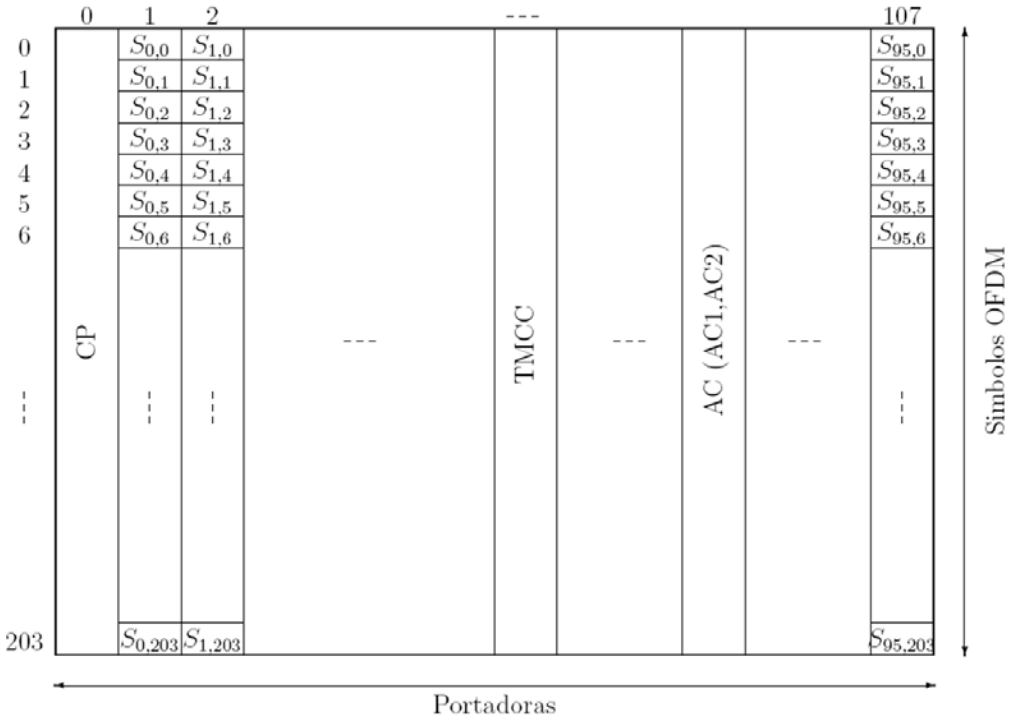


Figura 39: Configuração do Segmento OFDM para Modulação Diferencial.

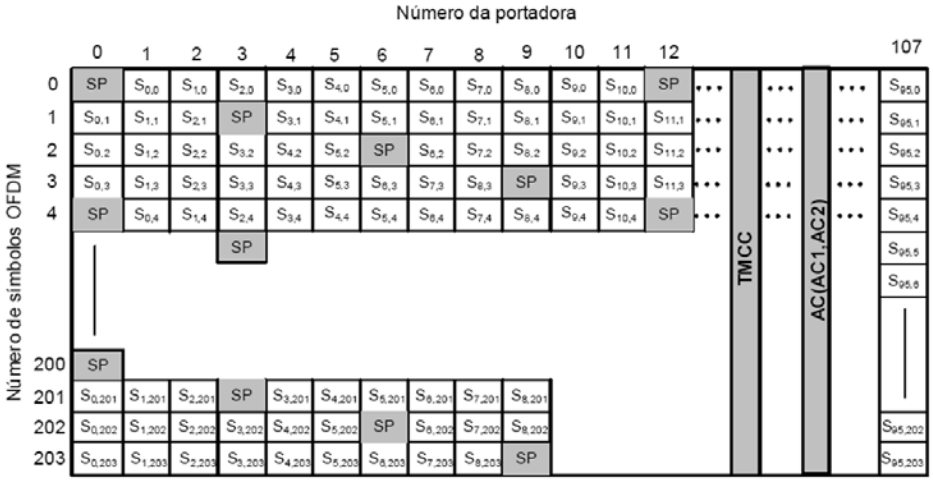


Figura 40: Configuração do Segmento OFDM para Modulação Diferencial (QPSK, 16QAM, 64QAM) no Modo 1.

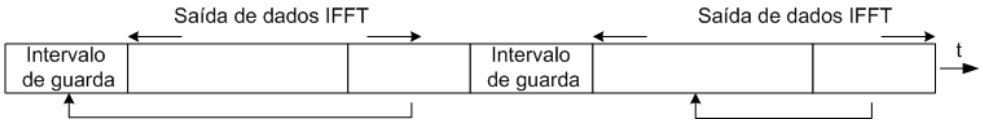


Figura 41: Inserção do Intervalo de Guarda.

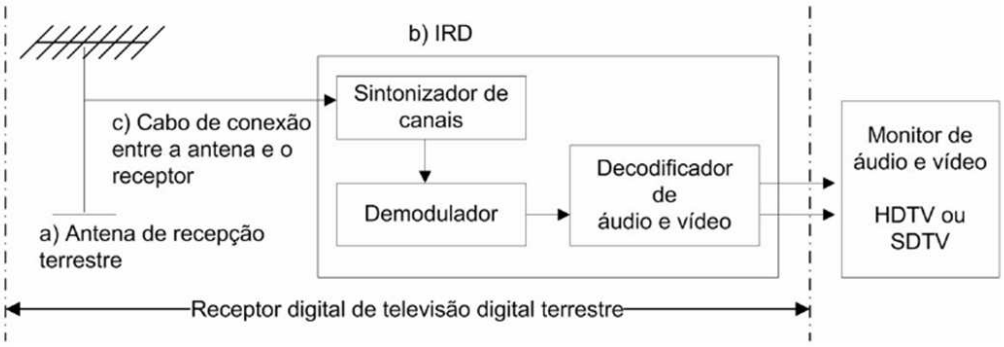


Figura 42: Configuração Básica do Receptor.

5 *Proposta para Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital*

NESTE capítulo é proposto uma ferramenta para estimação da cobertura da intensidade do sinal de televisão digital na cidade de Goiânia para alguns cenários pré-estabelecidos. Os cenários levam em conta alguns fatores como a condição de recebimento do sinal de televisão digital para *one-seg* e *full-seg*.

O capítulo está organizado em três seções. A primeira seção discorre sobre a coleta dos dados, discrimina os equipamentos utilizados, informa como foram realizadas as escolhas dos sítios de medições espalhados pela grande Goiânia e discorre sobre os valores e as dificuldades encontrados nas medições. A segunda seção refere-se a determinação da estrutura da rede neural artificial que será utilizada na estimação da cobertura do sinal, o tratamento dos dados obtidos nas medições e sua utilização no treinamento da rede neural artificial. Por fim, o capítulo se encerra com as propostas dos cenários para obtenção da previsão da cobertura da intensidade do sinal por meio da RNA treinada.

5.1 Campanha de Medidas

A caracterização da propagação do sinal é de extrema importância para a implementação e desempenho de qualquer sistema de radiofrequência. Nesta seção,

serão descritos os equipamentos utilizados na campanha de medidas, os critérios para a escolha dos sítios de medições espalhados na cidade de Goiânia e os dados obtidos na campanha de medidas.

5.1.1 Equipamentos Utilizados

Para a realização das medições necessárias para a conclusão deste trabalho utilizou-se dois equipamentos de suma importância: Sistema de Posicionamento Global (do inglês *Global Positioning System* - GPS) e o Analisador de Radiofrequência.

5.1.1.1 Sistema de Posicionamento Global

Um sistema de posicionamento global tem como principal propósito prover sinais que permitam que qualquer usuário, equipado com um receptor GPS, possa calcular corretamente e em tempo real sua posição geográfica (longitude, latitude e altitude). O sistema é formado por dois segmentos: o segmento espacial e o terrestre (TRIMBLE, 2009).

O segmento espacial é composto por 24 satélites em órbita, sendo seis órbitas diferentes com quatro satélites em cada órbita. Em alguns momentos, vários pontos da terra são visualizados ao mesmo tempo por seis a dez satélites que focam a mesma área, o que fornece redundância, pois apenas quatro satélites são necessários para uma determinação tri-dimensional de posição (TRIMBLE, 2009).

O segmento terrestre é sub-dividido nos sub-segmentos de controle e de usuário. O sub-segmento de controle é composto por estações de monitoramento espalhadas pela terra que processam todos os dados e então enviam a correção e sinais de controle para os satélites. Assim, o sub-segmento de controle monitora o desempenho total do sistema, corrige posições do satélite e reprograma o sistema com o padrão necessário (TRIMBLE, 2009).

O sub-segmento de usuário consiste de receptores GPS que convertem os sinais

dos satélites em posição, velocidade e tempo estimado. A posição pode ser determinada com os valores da distância de três posições diferentes conhecidas pelo método de triangulação, apresentado na Figura 43. Conhecendo a distância em relação a três ou mais satélites, o receptor pode calcular a sua posição com base numa série de equações. Em teoria, a distância pode ser calculada multiplicando o tempo que o sinal demora a chegar pela velocidade a que este viaja, ou seja a velocidade da luz. No entanto, na prática são necessários cálculos mais sofisticados, uma vez que podem existir inúmeras interferências, como as condições atmosféricas ou as perturbações do sol. A informação de três satélites é necessária para calcular a longitude e a latitude. Entretanto, são necessários quatro para calcular também a altitude (TRIMBLE, 2009).

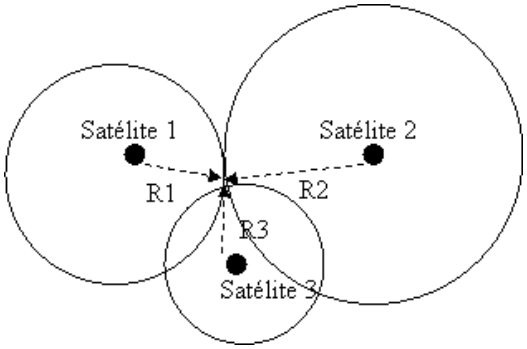


Figura 43: Método de Triangulação.

Neste trabalho utilizou-se um receptor GPS modelo $eTrexVistaHCx$ de alta sensibilidade para um desempenho formidável em qualquer ambiente da marca *Garmin*, apresentado na Figura 44 (GARMIN, 2009).

Esse modelo é equipado com altímetro barométrico que fornece informação precisa da elevação e perfil vertical do terreno e uma bússola eletrônica que indica ao usuário a direção a seguir, mesmo que não esteja em movimento (GARMIN, 2009).

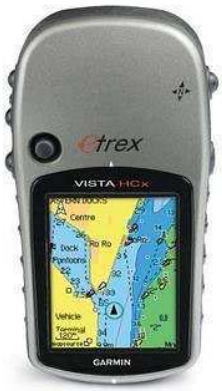


Figura 44: GARMIN - eTrex Vista HCx.

5.1.1.2 Analisador de Radiofrequência

O dispositivo de medição da intensidade do sinal em uma determinada faixa de frequência utilizado nas medições realizadas neste trabalho foi o analisador de radiofrequência *FieldFox* N9912A do fabricante *Agilent*, apresentado na Figura 45 (TECHNOLOGIES, 2009).

Dentre as funcionalidades encontra-se o analisador de espectro (do inglês: *Spectrum Analyzer* - SA), opcional que possibilita a determinação da intensidade do sinal em dBm para cada ponto de frequência na largura de faixa desejada. Este modo de operação do analisador de radiofrequência não necessita de calibração, somente a conexão da antena receptora no conector específico do dispositivo e sua configuração que será descrita a seguir (TECHNOLOGIES, 2009).

A antena utilizada no analisador de radiofrequência que acompanha o equipamento, é o modelo RH 799 da marca *Diamond Antenna*. Ela possui uma resistência de 50 Ω, uma altura máxima de 1,135 m e uma faixa de frequência de 70 a 1000 MHz. A Figura 46 apresenta a antena utilizada (TECHNOLOGIES, 2009).

Para o correto funcionamento do analisador de radiofrequência no modo SA algumas configurações devem ser realizadas antes do início das medições. A primeira

Figura 45: Analisador de Radiofrequência *FieldFox* N9912A, da Marca *Agilent Technologies*.

configuração refere-se ao *range* de frequência a ser analisada pelo espectro. Em seguida, determina-se a resolução de largura de faixa que possibilita ao analisador de espectro uma maior resolução, onde a resolução de largura de faixa é pequena, ou menor resolução, onde a resolução de largura de faixa é grande em relação ao sinal medido. Outra configuração importante é o *Sweep Acquisition* que é definido como o valor mínimo exigido com as configurações atuais para se atingir com precisão a amplitude ao medir sinais de radiofrequência. Quanto maior for o valor do *Sweep Acquisition*, maior é precisão do SA em separar a amplitude do sinal a ser medido dos sinais de ruído. Finalizando, a configuração da resolução é descrita como a quantidade de pontos visualidados no SA no eixo da frequência e quanto maior o seu valor, maior é a precisão da intensidade de sinal amostrado pelo SA. A Tabela 19 fornece os dados de configuração utilizados no presente trabalho para a medição do sinal de televisão digital transmitido pela TV Anhanguera (TECHNOLOGIES, 2009).

O analisador de radiofrequência disponibiliza a opção para exportar os dados

Figura 46: Antena retrátil RH799, da Marca *Diamond Antenna*.

obtidos da intensidade de sinal (dBm) *versus* frequência, para arquivo de extensão .csv que pode ser utilizado em qualquer editor de planilha. Portanto, com os valores de intensidade de sinal para a faixa de frequência desejada, calcula-se a valor médio da intensidade de sinal, obtendo-se um valor único de intensidade de sinal em dBm para um sítio de medição.

A Figura 47 apresenta a forma de onda obtida com o analisador de espectro configurado para a recepção digital da TV Anhanguera, conforme descrito na Tabela 19, para o ponto 79 (descrito na próxima seção).

5.1.2 Escolha dos Sítios de Medições

A *International Telecommunication Union* (ITU), através do *Report ITU-R BT.2035-1*, recomenda que todos os testes, medições e coleta de dados, relativos a sistemas de radiodifusão televisiva digital terrestre, sejam conduzidas de acordo com o conjunto de princípios e procedimentos gerais descritos no relatório. Dessa forma, a análise e os resultados obtidos serão consistentes, significativos e uniformizados, possibilitando a comparação de estudos realizados em diversas localidades e por diversos grupos (UNION, 2004).

O relatório define três tipos de testes de campo: teste de cobertura, teste de recepção e teste de captura das características do canal.

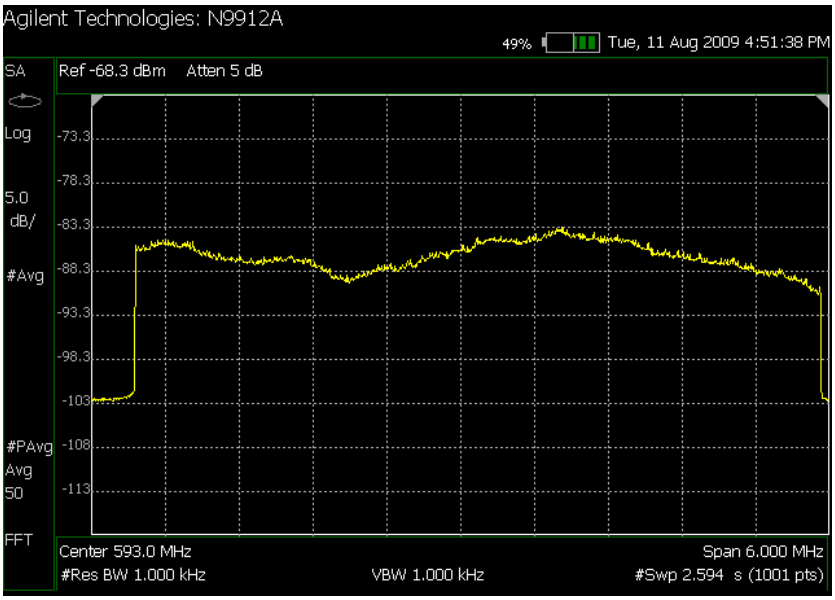


Figura 47: Forma de Onda Obtida pelo Analisador de Espectro para Recepção Digital da TV Anhanguera no Ponto 79.

O teste de cobertura é definido como a determinação da atual força do campo medido para uma dada configuração de transmissão. As medições são feitas utilizando métodos de testes normalizados, que utilizam, geralmente, antenas calibradas para um padrão dipolo e colocada a 9,1 metros de altura acima do solo. Esse teste é utilizado para verificar a cobertura da região, os padrões de radiação da antena transmissora e fornecer dados para o planejamento de fatores para alocação de estações de radiodifusão (UNION, 2004).

O teste de recepção é definido como o processo de determinação das condições sob as quais o sinal de televisão digital pode ser recebido e decodificado sobre várias condições de operação. Medições de serviço, geralmente, utilizam receptores de TV Digital que possam ser conectados em equipamentos para obtenção do nível de sinal, relação sinal/ruído, taxa de erro, entre outros (UNION, 2004).

O teste de captura das características do canal é utilizado para determinar as características do canal e é realizado com medições detalhadas de condições específicas do sinal em tempos e localidades específicas, usando antenas fixas ou

móveis (UNION, 2004).

O relatório propõe cinco diferentes modos de recepção: fixo, portátil, pedestre, móvel e pessoal. O modo fixo é caracterizado por receptores e antena imóveis, tendo a antena fixada no teto ou no interior da dependência. No modo portátil, a recepção é feita por receptor com antena própria e que pode ser movido, porém, deve permanecer estacionário durante a operação. O modo pedestre é caracterizado por um receptor que se encontra em movimento com velocidade máxima de 5 km/h. Na recepção móvel, o receptor encontra-se em movimento com velocidade superior a 5 km/h. Por fim, o modo pessoal é caracterizado por um receptor que se movimenta com velocidade de no mínimo 5 km/h e possui uma antena de baixo ganho, tipicamente um receptor de mão (UNION, 2004).

Ao analisar os objetivos e equipamentos disponíveis para a realização deste trabalho, determinou-se que o teste de recepção para o modo de recepção portátil é a configuração mais adequada, visto que o analisador de freqüência permanecerá imóvel no momento da medição.

O relatório sugere que os sítios de medições se localizem em radiais igualmente espaçadas, com no mínimo oito radiais, a cada 3 km, iniciando-se a uma distância de 3 km da antena transmissora. Logo, traçou-se 36 radiais igualmente espaçadas, tendo como ponto de origem a antena transmissora. Foram demarcados a cada 3 km, iniciando-se a 3 km da antena transmissora, os sítios de medições até o primeiro sítio que se localizava fora dos limites da cidade de Goiânia. O relatório sugere ainda que a duração do teste em cada sítio esteja no intervalo de segundos a minutos. No trabalho proposto adotou-se como duração do teste o tempo de cinco minutos, tempo suficiente para estabilização do sinal no analisador de frequência. A Tabela 20 resume as características adotadas para a configuração do método de medição utilizado neste trabalho (UNION, 2004).

A Figura 48 apresenta a posição dos sítios de medições, determinados pela configuração dada pela Tabela 20, que se encontram dentro dos limites da grande de Goiânia.

Figura 48: Sítios de Medições.

Ao analisar a Figura 48, observa-se que existem 189 sítios de medições (pontos amarelos) espalhados na cidade de Goiânia, situados em radiais que partem da antena (ponto azul).

5.1.3 Medições

As medições foram realizadas nos meses de maio e junho de 2009. O sistema de medição utilizado compunha-se de um GPS para localização (ver seção 5.1.1.1), do analisador de radiofrequência (ver seção 5.1.1.2) para as aferições e de um automóvel para o deslocamento. As aferições eram realizadas nos sítios determinados na Seção 5.1.2 com uma antena de altura máxima acima do solo de 2 metros.

Em cada sítio de medição foram realizadas anotações sobre fatores da região que influenciam na recepção do sinal. Determinou-se quatro características, do ambiente de medição, que influenciaram fortemente a qualidade do sinal recebido, foram elas: visada direta, distância entre as antenas, concentração de prédios e concentração de árvores. A característica visada direta é de grande importância e informa se há visada direta entre as antenas transmissora e receptora, ou seja, se não há obstrução entre as antenas considerando uma linha reta que as ligam. A distância entre as antenas transmissora e receptora é outro fator de grande influência na qualidade do sinal. Os fatores concentração de prédios e concentração de árvores atuaram de forma semelhante na intensidade de sinal, na presença de algum desses fatores, a intensidade de sinal é degradada. Esses fatores foram escolhidos pois são de fácil detecção na região do sítio de medição, sem a necessidade de dispositivo para suas aferições.

Durante a campanha de medidas, alguns sítios determinados na Seção 5.1.2 não puderam ser aferidos. A Figura 49 apresenta os sítios de medições que foram efetivamente aferidos, totalizando 103 sítios. O mapa apresentado na Figura 49 é dividido em seis partes (Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 E Q6) para o melhor entendimento dos dados apresentados no Anexo A.

Alguns sítios de medições se localizavam em propriedade privada urbana e na zona rural da grande Goiânia, fazendo com que as medições fossem realizadas na localização mais próxima do sítio até o limite de 1 km. Os sítios em que o acesso era proibido e a localização mais próxima encontrava-se a mais de 1 km de distância, não foram aferidos pois descaracterizavam o padrão de sítios sugeridos pelo *Report* ITU-R BT.2035-1.

O Anexo A apresenta uma tabela com os valores da intensidade do sinal para os modos de recepção *full-seg* e *one-seg* em cada ponto aferido na campanha de medidas e figuras para a localização dos pontos na cidade de Goiânia. As medições para o modo de recepção *full-seg* não estão de acordo com o *Report* ITU-R BT.2035-1. Assim, neste caso, os dados medidos apresentados podem ser considerados apenas

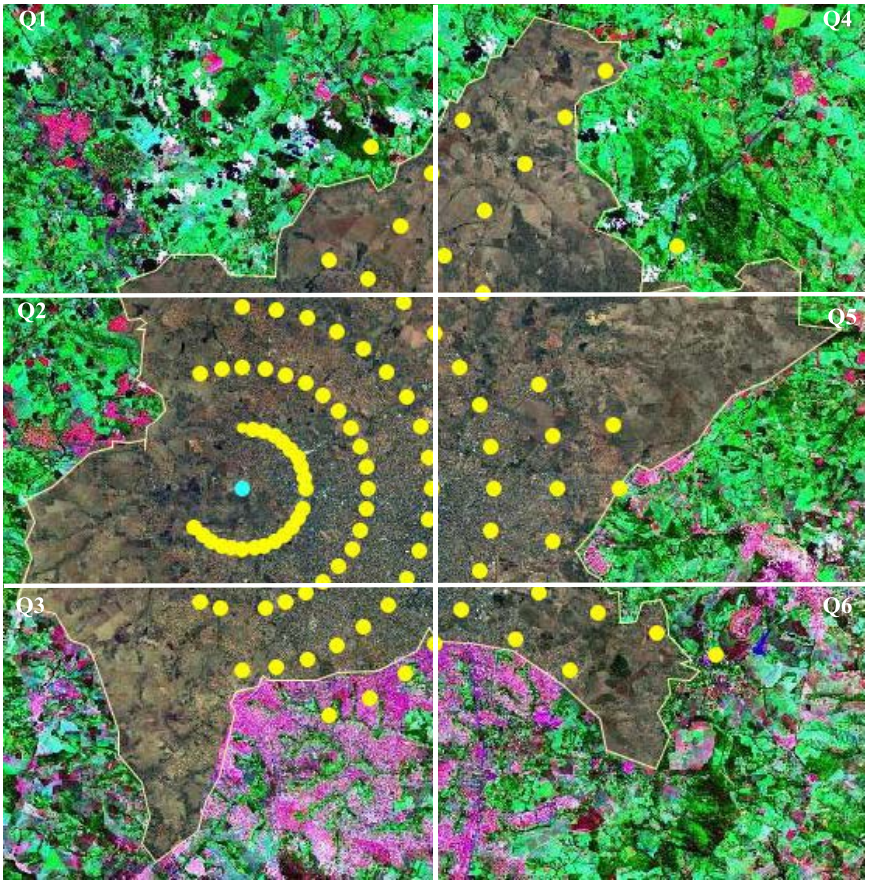


Figura 49: Sítios de medições efetivamente medidos.

como uma tentativa de obtenção dos valores reais e intermediários da intensidade do sinal numa melhor condição de recepção (com antena fixa no topo de uma edificação) e pior condição (com antena fixa no interior da edificação).

A Figura 50 apresenta a intensidade de sinal para os modelos de propagação descritos na Seção 2.3 e dos sítios efetivamente medidos para a recepção *one-seg*.

A Figura 51 apresenta a intensidade de sinal para os modelos de propagação descritos na Seção 2.3 e dos sítios efetivamente medidos para a recepção *full-seg*.

Em ambas Figuras 50 e 51, a conversão de unidades de dBμV/m em dBm, para o modelo ITU-R P.1546-1, foi realizada de acordo com o Apêndice C considerando

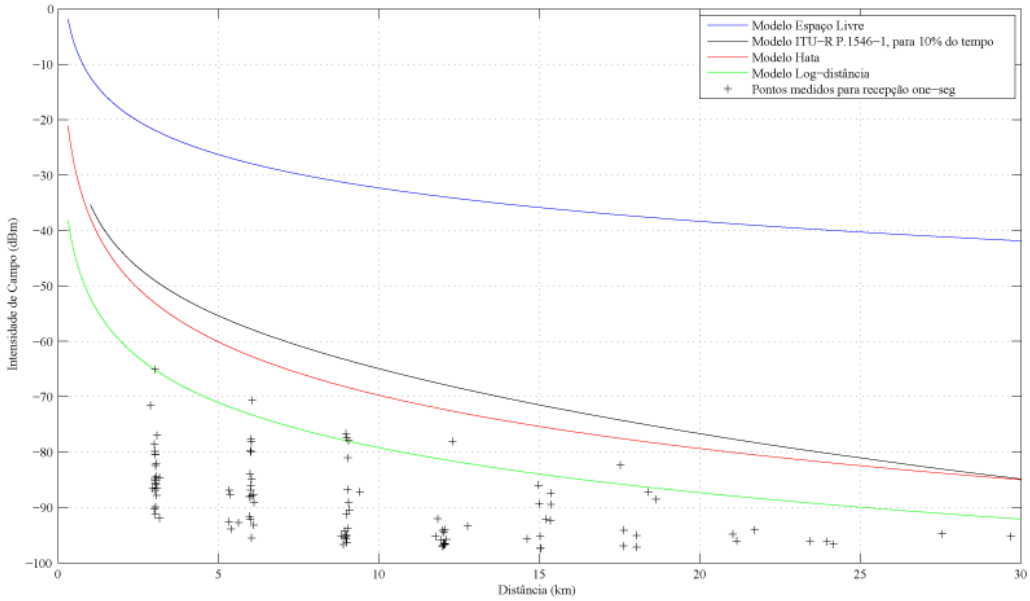


Figura 50: Intensidade de sinal para os modelos de propagação e pontos medidos (dBm), no modo de recepção *one-seg*.

uma antena de recepção com resistência de 50 Ω e os dados obtidos da curva apresentada nas Figuras 8 e 7 para 10% do tempo. Observa-se que os sítios aferidos apresentam valores de intensidade menores que os demais modelos de propagação para os dois modos de recepção, incluindo o método ITU-R P.1546-1 que é adotado pela ANATEL para a determinação da intensidade do sinal. Percebe-se, também, que o modelo de propagação que mais se aproxima da realidade da cidade de Goiânia é o modelo Log-distância.

5.2 Proposta da Arquitetura do Perceptron de Múltiplas Camadas para Estimação da Cobertura do Sinal

Nesta seção são apresentadas as etapas realizadas para a determinação da melhor configuração da RNA que satisfaça a proposta do trabalho. Inicia-se

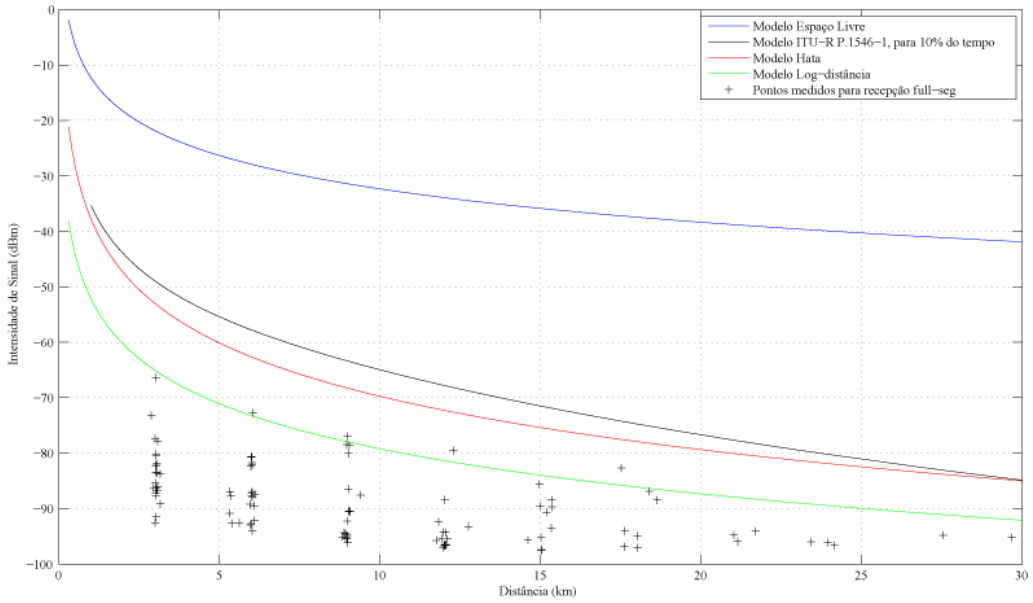


Figura 51: Intensidade de sinal para os modelos de propagação e pontos medidos (dBm), no modo de recepção *full-seg*.

pela descrição da arquitetura da rede neural, pela determinação da quantidade de neurônios da camada escondida e características de cada entrada e saída. Em seguida, determina-se a forma de normalização e o tratamento dos dados a serem utilizados no treinamento da rede neural. Finalmente, apresenta-se o treinamento supervisionado da rede neural utilizando o algoritmo de retropropagação do erro para a determinação dos melhores parâmetros livres da rede e do número de neurônios presentes na camada oculta da RNA.

5.2.1 Arquitetura

A arquitetura de uma RNA é definida pela caracterização de suas camadas, ou seja, pela quantidade e características das entradas, dos neurônios da camada escondida e de saída. Neste caso, a arquitetura é definida de acordo com o tipo de dados medidos apresentados na Seção 5.1.3.

A Figura 52 apresenta a arquitetura da rede neural MLP adotada para a

proposta deste trabalho, composta por cinco unidades na camada de entrada e por um neurônio de saída na camada de saída. A primeira entrada, denominada "visada", fornece à rede a informação de existência ou não de visada direta entre a antena transmissora e receptora. A segunda entrada, "concentração de prédios", informa à rede neural se naquele ambiente há, ou não, concentração de prédios. A entrada "concentração de árvore", terceira entrada da rede neural, fornece à rede a informação de existência de concentração de árvores ao redor do ambiente em que a estimação da intensidade de sinal será realizada pela rede. A quarta entrada, "distância", como o próprio nome diz, fornece a rede neural o valor da distância entre as antenas transmissora e receptora. Finalizando, a última entrada, "condição de recebimento", informa à rede neural qual é a condição de recebimento naquele ambiente, condição que é influenciada pelo fenômeno de múltiplos percursos.

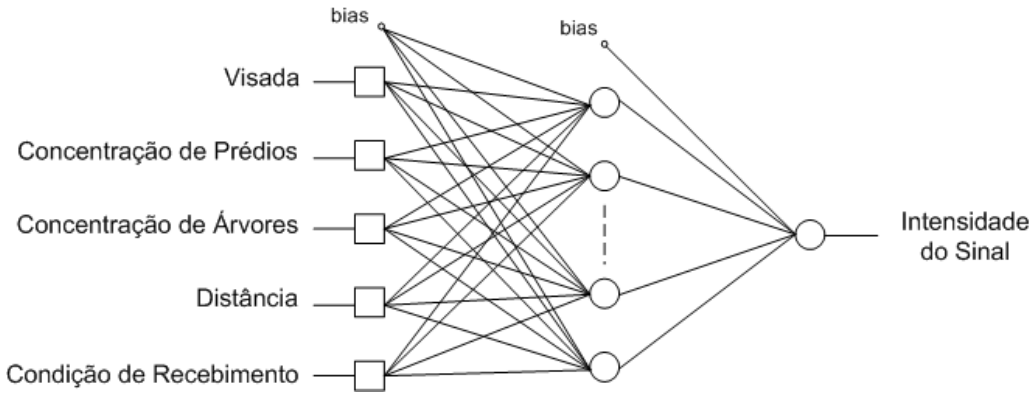


Figura 52: Arquitetura da Rede Neural MLP proposta.

A função de ativação utilizada na saída de cada neurônio que compõe a rede neural foi a sigmóide bipolar, variando de -1 a +1 . A configuração da camada oculta será determinada na Seção 5.2.3, após o treinamento da rede neural que fornecerá a quantidade de neurônios ocultos que resultará em uma rede neural com melhor desempenho. Finalizando a definição da arquitetura, a camada de saída é composta de um único neurônio de saída que fornece ao usuário a informação da intensidade de sinal em dBm, após a desnormalização, para as condições do ambiente fornecidas na camada de entrada.

5.2.2 Tratamento dos Dados

Os dados adquiridos na campanha de medição devem ser normalizados antes de serem utilizados pela rede neural. Essa normalização foi realizada para todas as entradas e saída da rede neural, tendo como limites inferior e superior de normalização os valores -0,9 e 0,9. Os métodos de normalização, assim como os limites, são os mesmos para os grupos de dados *full-seg* e *one-seg*, a exceção é a entrada condição de recebimento que possui métodos de normalização específicos para cada modo de recepção.

Os dados referentes a presença de visada direta entre as antenas transmissora e receptora foram normalizados de forma que se no ponto medido há presença de visada direta, o seu valor para a entrada na rede neural é igual a 0,9. Caso contrário, ou seja, se não houver visada direta a entrada na rede neural é igual a -0,9.

A segunda e terceira entradas da rede neural (concentração de prédios e concentração de árvores) foram normalizadas de forma semelhante. Nos casos em que há presença de prédios ou árvores, a entrada da rede neural é igual a 0,9, nos casos em que não houver presença de prédios e árvores a entrada da rede neural receberá o valor igual a -0,9.

Os valores de distância entre as antenas transmissora e receptora adquiridos na campanha de medição se concentram no intervalo de 3 a 30 km. No entanto, para a normalização utiliza-se o intervalo de 0 a 30 km referente ao intervalo -0,9 a 0,9 da função de ativação. A formulação dada pela Equação 5.1 apresenta a forma de cálculo da normalização da distância utilizada.

$$d_n = \frac{1,8d}{30} - 0,9, \tag{5.1}$$

onde d é a distância em km entre as antenas e d_n é a distância normalizada.

A última entrada (condição de recebimento) foi modelada através de um estudo

dos dados obtidos na campanha de medição. Os dados foram divididos em grupos de acordo com as entradas (visada direta, concentração de prédios e concentração de árvores) e em seguida traçou-se uma linha de tendência relativa aos sítios medidos para então determinar os valores de condição de recebimento. Através da linha de tendência e dos sítios medidos foi possível determinar os sítios que possuem a maior variação positiva e negativa, com condição de recebimento 0,9 e -0,9, respectivamente. O ponto com a maior variação positiva possui a melhor condição de recebimento, enquanto que, o ponto com a maior variação negativa, possui a pior condição de recebimento. De posse dos limites superior e inferior da condição de recebimento, utiliza-se uma regra de três para os demais pontos medidos com o objetivo de determinar o valor da condição de recebimento. A normalização dessa entrada é feita de forma singular para cada modo de recepção *one-seg* e *full-seg*, iniciando-se pelo tratamento dos dados referentes ao modo de recepção *one-seg*.

O primeiro grupo refere-se aos dados que possuem visada direta entre as antenas. A Figura 53 apresenta os pontos medidos que possuem visada direta e sua respectiva linha de tendência.

A linha de tendência do grupo de visada direta é regida pela Equação 5.2. Através da análise da Figura 53 e da Equação 5.2 conclui-se que o ponto medido de intensidade -70,678 dBm possui a melhor condição de recebimento e o ponto medido de intensidade -80,4233 dBm possui a pior condição de recebimento (pontos em vermelho na figura).

$$Tv_{one-seg}(d) = -8,3349.ln(d) - 61,165, \tag{5.2}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

O segundo grupo possui os dados obtidos para o cenário de concentração de prédios e sem visada direta entre as antenas. A Figura 54 apresenta os pontos medidos e linha de tendência para o grupo sem visada direta e com concentração de prédios.

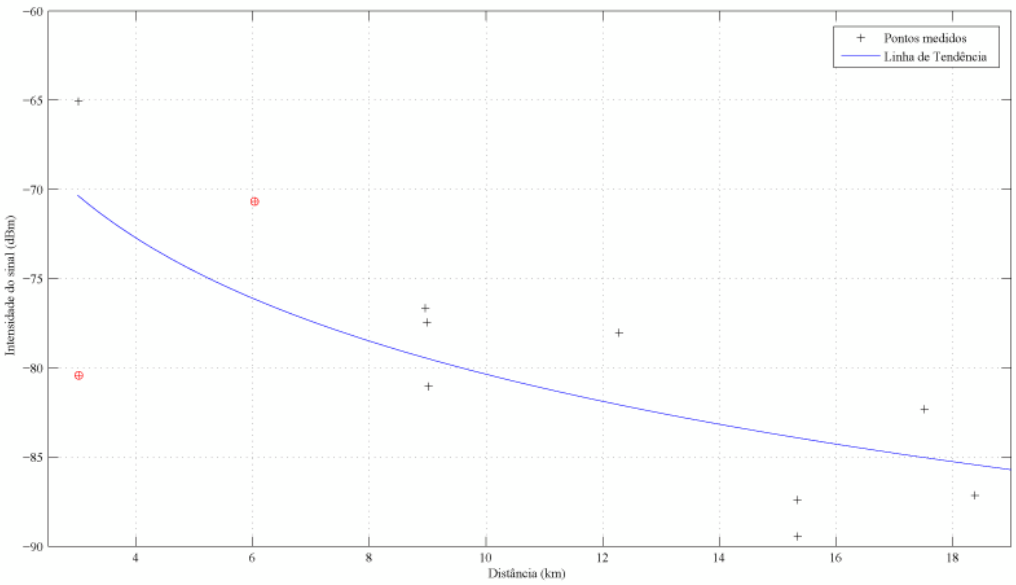


Figura 53: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *One-seg* com Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência.

A Equação 5.3 apresenta a forma de cálculo para a linha de tendência utilizada. Através da Equação 5.3 e da Figura 54 é possível localizar os pontos com a maior variação positiva e negativa. Logo, o ponto com a maior variação positiva e, consequentemente, a melhor condição de recebimento possui a intensidade de -77,9416 dBm e o ponto com a maior variação negativa, ou seja, a pior condição de recebimento tem intensidade igual a -93,8921 dBm (círculos vermelhos, Figura 54).

$$Tp_{one-seg}(d) = -10,51.ln(d) - 67,934, \tag{5.3}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

O terceiro grupo é composto pelas medições onde não há presença de visada direta e há concentração de árvores na imediações. A Figura 55 apresenta os pontos medidos nesse grupo e sua respectiva linha de tendência descrita pela Equação 5.4.

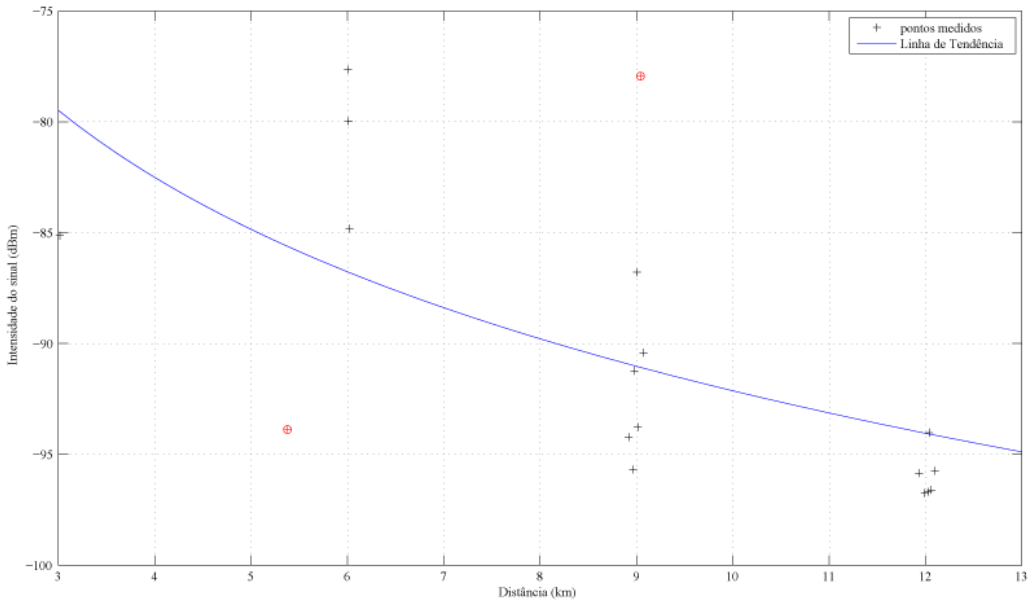


Figura 54: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *one-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Prédios e sua Respectiva Linha de Tendência.

$$Ta_{one_seg}(d) = -3,8378.ln(d) - 83,411, \tag{5.4}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

Analisando a Figura 55 e a Equação 5.4, determina-se os pontos de maior variação positiva e negativa entre os pontos medidos e a linha de tendência. O ponto medido de melhor condição de recebimento, maior variação positiva, tem intensidade igual a -85,9725 dBm, enquanto que, o ponto medido com pior condição de recebimento tem intensidade igual a -96,6532 dBm (os pontos estão demarcados de vermelho na Figura 55).

O último grupo, caracteriza-se pelos dados em que não há visada direta entre as antenas transmissora e receptora e por outros motivos, não apresentam concentração de prédios e de árvores. A Figura 56 apresenta o pontos medidos desse grupo, juntamente com sua linha de tendência que é descrita pela Equação 5.5.

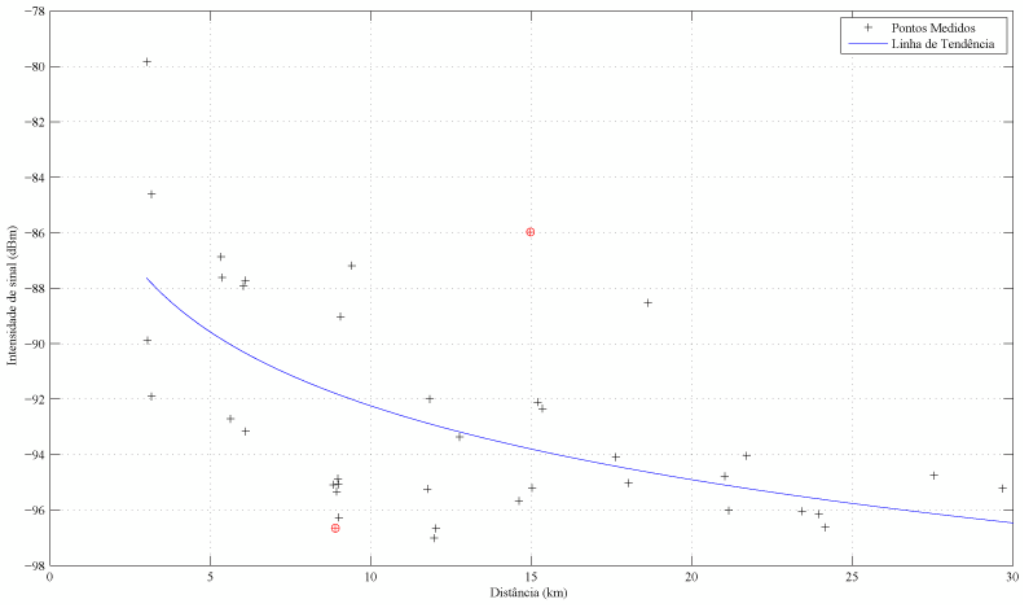


Figura 55: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para Recepção *One-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Árvores e sua Respectiva Linha de Tendência.

$$Tsv_{one-seg}(d) = -7,2044.ln(d) - 75,608, \tag{5.5}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

Os pontos demarcados em vermelho na Figura 56 representam os pontos com melhor e pior condição de recebimento. O sítio com intensidade de -71,5737 dBm possui a melhor condição de recebimento, ou seja, tem a maior variação positiva entre o ponto medido e a linha de tendência. O ponto com intensidade de -91,25 dBm possui a pior condição de recebimento por ter a maior variação negativa entre o ponto medido e a linha de tendência. Com a normalização do último grupo de condição recebimento, encerra-se a normalização e tratamento dos dados de entrada para a recepção *one-seg*.

O tratamento da entrada condição de recebimento para o modo de recepção *full-seg* ocorre de forma similar ao tratamento do modo de recepção *one-seg*. O

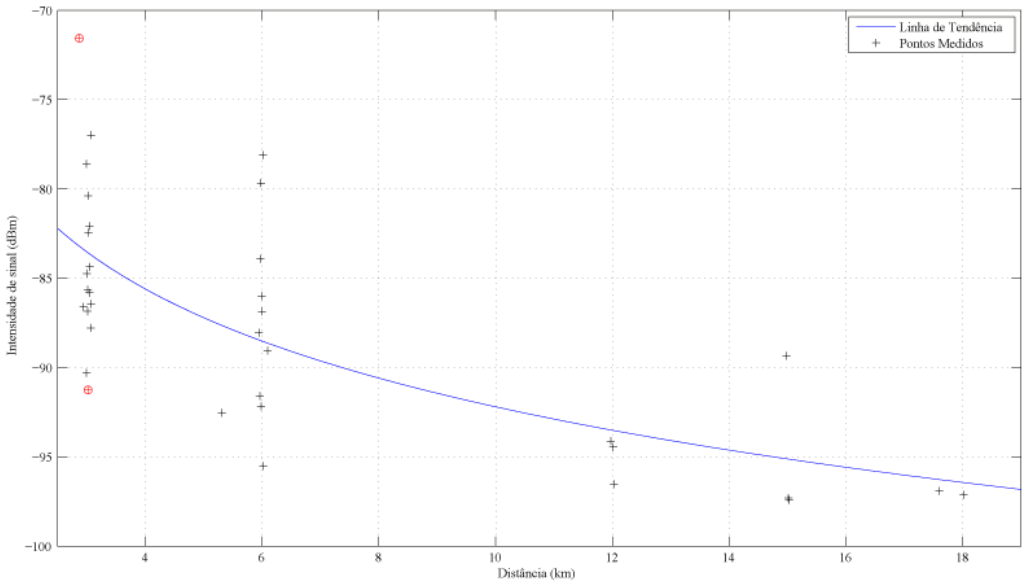


Figura 56: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *one-seg* sem Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência.

primeiro grupo, dos dados com visada direta, é normalizado de acordo com sua linha de tendência que é apresentada pela Figura 57 juntamente com os sítios aferidos desse grupo. O sítio com a intensidade de -66,3594 dBm possui a melhor condição de recebimento e o sítio com intensidade de -80,1584 dBm possui a pior condição de recebimento (pontos marcados pelo círculo vermelho na Figura 57).

A equação da linha de tendência do grupo com visada para o modo de recepção *full-seg* é apresentada pela equação a seguir

$$Tv_{full-seg}(d) = -8,1154.ln(d) - 62,207, \tag{5.6}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

O segundo grupo, sem visada e com concentração de prédios, tem as intensidades de sinal de sua linha de tendência e sítios aferidos apresentadas na Figura 58. O sítio de intensidade -92,6628 dBm possui a pior condição de recebimento e o sítio de intensidade -78,4968 dBm possui a melhor condição de recebimento

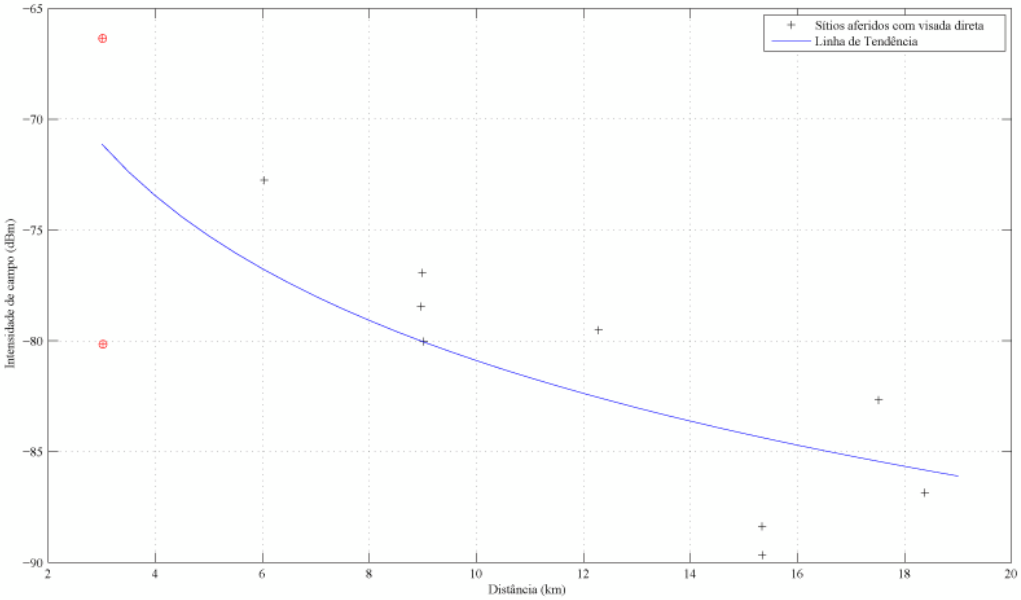


Figura 57: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *Full-seg* com Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência.

(pontos marcados na Figura 58 pelos círculos vermelhos).

A Equação 5.7 apresenta a formulação matemática da linha de tendência desse grupo.

$$Tp_{full-seg}(d) = -8,7224.ln(d) - 72,046, \tag{5.7}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

O grupo de concentração de árvores, terceiro grupo, tem a intensidade de sinal em dBm de sua linha de tendência e sítios aferidos apresentados na Figura 59 e a Equação 5.8. O sítio de intensidade -96,1785 dBm possui a pior condição de recebimento e o sítio de intensidade -85,5720 dBm possui a melhor condição de recebimento, (pontos identificados pelos círculos vermelhos na Figura 59).

$$Ta_{full_{seg}}(d) = -4,1804.ln(d) - 82,456, \tag{5.8}$$

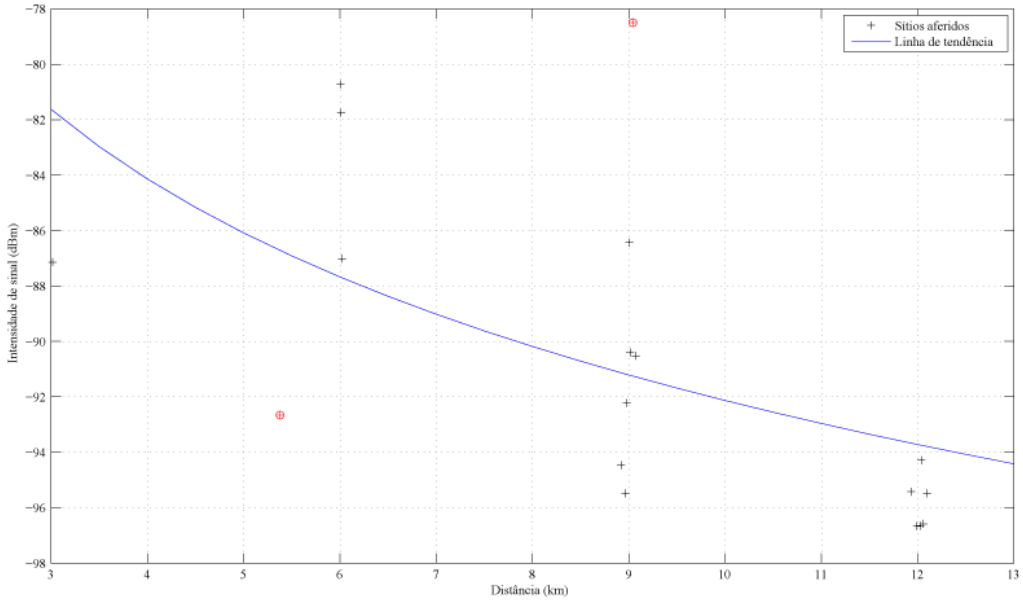


Figura 58: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *Full-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Prédios e sua Respectiva Linha de Tendência.

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

O último grupo, composto pelos dados que não possuem visada direta, não possui concentração de árvores ou prédios. A Figura 60 apresenta a linha de tendência e os sítios aferidos destes grupo. Os sítios com intensidade -92,5351 dBm e -73,2065 dBm possuem a pior e melhor condição de recebimento (pontos marcados na Figura 60 pelos círculos vermelhos).

A linha de tendência desse último grupo é dada pela equação

$$Tsv_{full_seg}(d) = -6,8642.ln(d) - 76,139, \tag{5.9}$$

onde d é a distância entre as antenas transmissora e receptora em km.

Analisando os dados de intensidade obtidos na campanha de medição define-se o intervalo de intensidade de -98 dBm à -64 dBm que é normalizado, em ambos os modos de recepção (*one-seg* e *full-seg*) para o intervalo de -0,9 à 0,9 de acordo

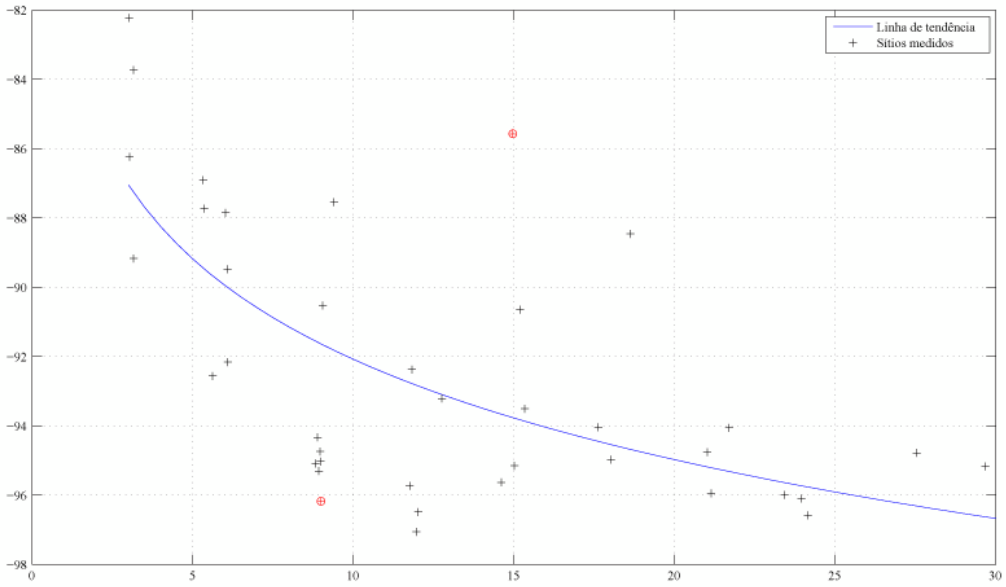


Figura 59: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para Recepção *Full-seg* sem Visada Direta e com Concentração de Árvores e sua Respectiva Linha de Tendência.

com a Equação 5.10.

$$In = 1,8\frac{I + 98}{34} - 0,9, \tag{5.10}$$

onde In é a intensidade de sinal normalizada e I é a intensidade de sinal em dBm.

5.2.3 Treinamento

Esta sub-seção descreve o procedimento de treinamento da RNA para a determinação dos parâmetros de treinamento da rede e do número de neurônios localizados na camada escondida. Os 103 sítios aferidos foram separados em três grupos. O primeiro grupo com 76 sítios, é utilizado para o procedimento de treinamento. O segundo grupo com 14 sítios, é utilizado no processo de validação cruzada e o terceiro grupo, com 13 sítios, é utilizado para a validação da estimação da RNA.

Realizou-se um treinamento supervisionado utilizando o algoritmo de retro-

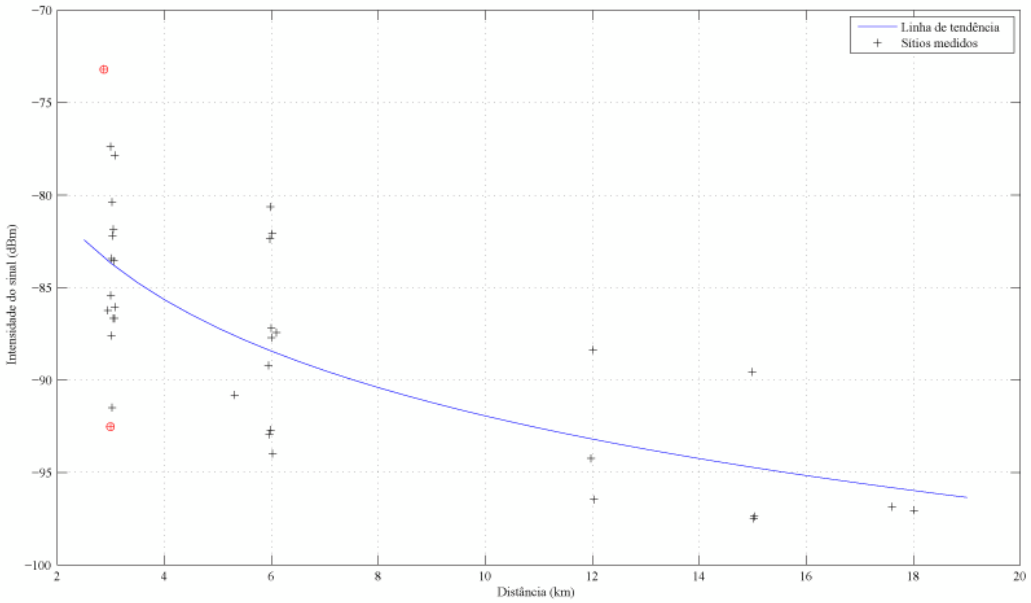


Figura 60: Intensidade de Sinal em dBm para os Sítios Medidos para a Recepção *Full-seg* sem Visada Direta e sua Respectiva Linha de Tendência.

propagação do erro com validação cruzada e sem validação cruzada para os dados do modo de recepção *one-seg* e treinamento com validação cruzada para os dados do modo de recepção *full-seg*. O treinamento sem a validação cruzada foi realizado para as configurações descritas na Tabela 21 para 10, 20, 30 e 40 neurônios na camada escondida e um número máximo de 200000 épocas.

Os resultados obtidos no treinamento sem validação cruzada para a recepção *one-seg* são apresentados nas Tabelas 22 à 25. Nessas tabelas encontram-se os valores de erro quadrático médio (EQM) de treinamento e de erro quadrático médio de validação da estimação da rede neural com os parâmetros de treinamento da rede determinados no treinamento. Nota-se que a rede neural com 10 neurônios na camada oculta, com taxa de aprendizagem igual a 0,01 e momento igual a 0,9 no processo de treinamento, possui o menor erro quadrático médio, sendo assim, a melhor configuração.

O treinamento com validação cruzada para a recepção *one-seg* foi realizada

Tabela 19: Configuração do Analisador de Frequência para o Canal Digital da TV Anhanguera.

	Valor Adotado
Faixa de Frequência	590 - 596 MHz
Resolução de faixa	1 kHz
Sweep Acquisition	10
Resolução	1001

Tabela 20: Configuração do Método de Medição.

Teste	Modo de Recepção	Duração	Escolha dos Sítios
Teste de Recepção	Portátil	5 min	36 radias igualmente espaçadas. Sítios escolhidos a cada 3 km, a partir do 3 km da antena transmissora

Tabela 21: Configurações de Treinamento.

Taxa de Aprendizagem	Momento
0,01	0,7
0,1	0,7
0,01	0,9

Tabela 22: Resultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 10 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,01	0,7	0,001315127013584	4,201562287662710
0,1	0,7	0,000254957004965	2,551261924939340
0,01	0,9	0,000606292284925	0,830265294948846

Tabela 23: RResultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 20 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,01	0.7	0,002955272222229	8,406586117818940
0,1	0.7	0,000331838792433	1,252661383392180
0,01	0.9	0,000674540280874	1,272698457676000

para 10, 20 e 30 neurônios na camada oculta, para as configurações de treinamento apresentados na Tabela 21. As Tabelas 26 à 28 apresentam os erros quadráticos médios dos treinamentos realizados com validação cruzada para diversas configurações.

Através dos resultados fornecidos pelas Tabelas 26 à 28, determina-se que a melhor configuração de rede neural é a que contém 10 neurônios na camada oculta e seu treinamento realizado com uma taxa de aprendizagem igual 0,1 e momento igual 0,7. A escolha dessa configuração é baseada no menor erro quadrático médio do treinamento e na validação da estimação da rede neural.

Após os treinamentos com e sem validação cruzada, a arquitetura da rede neural utilizada neste trabalho para a recepção *one-seg* foi determinada. Assim, a rede neural escolhida foi treinada com validação cruzada e possui 10 neurônios na camada oculta. Essa rede foi treinada com taxa de aprendizagem igual a 0,1 e momento igual a 0,7. A arquitetura da rede neural é apresentada na Figura 61.

A Tabela 29 apresenta os valores dos pesos da camada de entrada para a camada escondida para a arquitetura de rede neural definida para a recepção *one-seg*.

A partir do treinamento para o modo de recepção *one-seg*, conclui-se que o treinamento com validação cruzada é o que resulta em melhores resultados. Portanto, para o treinamento do modo de recepção *full-seg* utilizou-se somente o método de treinamento com validação cruzada com as mesmas configurações utilizadas (apresentadas na Tabela 21 para 10, 20 e 30 neurônios) no treinamento da rede neural para a recepção *one-seg*.

As Tabelas 31 à 33 apresentam os valores do erro quadrático médio para o treinamento com validação cruzada e para a validação da estimação da rede neural para os dados do modo de recepção *full-seg*. Analisando os dados apresentados, conclui-se que a rede neural com 10 neurônios na camada escondida e com um treinamento com validação cruzada utilizando uma taxa de aprendizagem igual a

Tabela 24: Resultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 30 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,01	0.7	0,001302698066466	5,415829911826560
0,1	0.7	0,000228756564493	1,848060660236730
0,01	0.9	0,000742875851410	1,953812760104900

Tabela 25: Resultados do Treinamento sem Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 40 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,01	0.7	0,001544403311226	5,156553137684260
0,1	0.7	0,000302777471649	3,124341523423750
0,01	0.9	0,000890503530734	2,772602508024510

Tabela 26: Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 10 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,1	0.6	0,00002883701803	0,337865130912671
0,1	0.7	0,000008116288683	0,115978817296214
0,1	0.9	0,000090343804094	3,87125035091333
0,08	0.9	0,000053342236334	1,50473772075667

Tabela 27: Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 20 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,1	0.7	0,000051151270765	0,331301401617008
0,1	0.9	0,000101643774873	0,416887536421968

Tabela 28: Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *One-seg* com 30 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,1	0.7	0,000050012535419	0,211622804952027
0,1	0.8	0,000048116628634	0,281682773569327

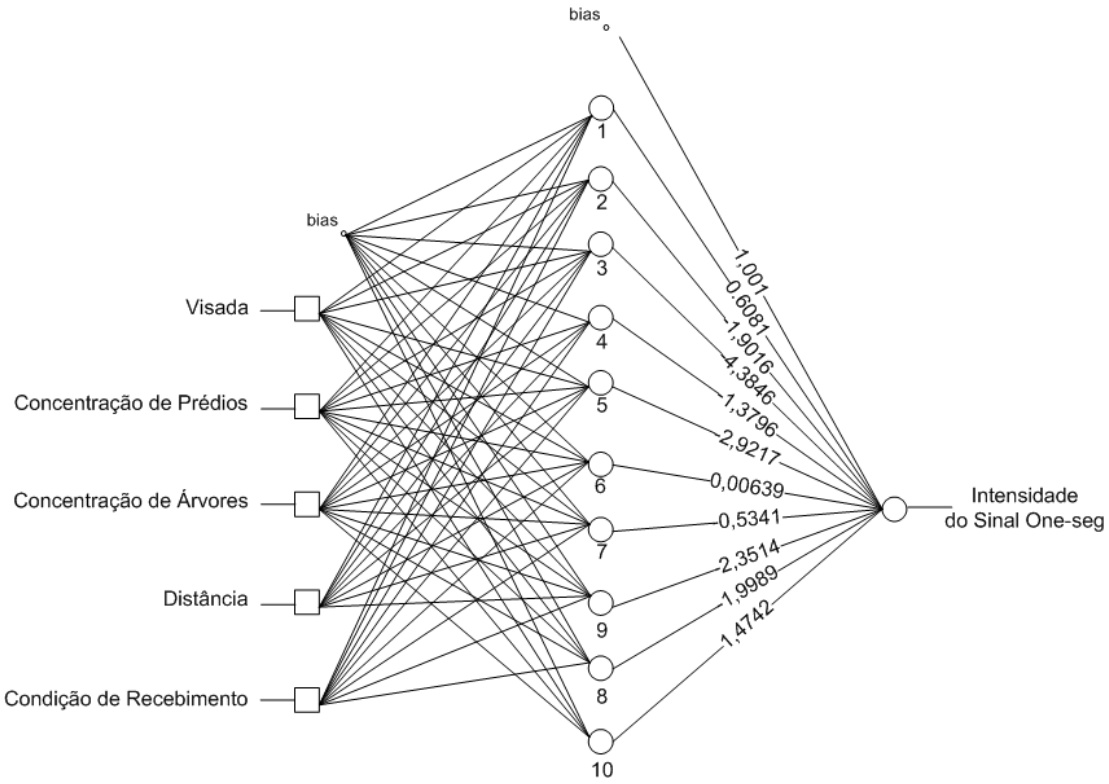


Figura 61: Arquitetura da Rede Neural Obtida após o Treinamento para o Modo de Recepção *One-seg*.

0,1 e momento igual a 0,7 resulta no menor erro quadrático médio do treinamento e na validação da estimação feita pela rede neural. A arquitetura da rede neural para o modo de recepção *full-seg* é apresentada pela Figura 62.

A Tabela 30 apresenta os valores dos pesos da camada de entrada para camada escondida obtidos pelo treinamento da arquitetura de rede adotada para a recepção *full-seg*.

Com a arquitetura da rede neural definida para os modos de recepção *one-seg* e *full-seg*, realiza-se um teste de estimação para comprovar o poder de extrapolação da RNA para a entrada distância. A intensidade do sinal de um ponto localizado a 1,534 km da antena, fora do intervalo de distância utilizado no treinamento e validação, possui o ambiente caracterizado conforme a Tabela 34.

Tabela 29: Valores dos Pesos da Camada de Entrada para a Camada Escondida para a Arquitetura Definida para a Recepção *One-seg*.

Neurônios da Camada Escondida	*Bias*	Visada	Concentração de Prédios	Concentração de Árvores	Distância	Condição de Recebimento
1	-0,1874	-1,7027	-0,0676	1,5527	1,7363	-2,4643
2	2,5398	2,7982	0,1115	-0,0065	2,0165	-0,3333
3	7,1819	-0,9067	-0,0727	0,3268	6,4778	-0,3582
4	-0,5951	-0,47	0,175	0,7536	-0,0063	2,0669
5	-4,4443	-1,0218	0,2064	-1,1296	2,7055	-2,6651
6	-0,4577	-0,1503	-0,0239	-0,4739	0,1131	0,1347
7	-0,5963	-0,3566	-0,7017	-0,0239	-0,5235	-0,1202
8	0,6988	-1,4135	-0,357	0,4314	2,383	0,2441
9	-1,356	0,1205	-0,8798	-1,4396	-1,6359	-2,1589
10	-0,1417	1,0652	-1,7193	-1,5132	1,73	2,2593

Tabela 30: Valores dos Pesos da Camada de Entrada para a Camada Escondida para a Arquitetura Definida para a Recepção *Full-seg*.

Neurônios da Camada Escondida	*Bias*	Visada	Concentração de Prédios	Concentração de Árvores	Distância	Condição de Recebimento
1	-0,1226	5,2476	0,355	-0,1193	-3,6795	1,0472
2	-0,3223	-0,0765	-0,2122	-0,1878	-0,0512	-0,1905
3	0,8707	1,7162	0,4257	-0,7181	-1,1806	-1,331
4	3,8213	0,332	0,0623	0,3885	2,5507	1,1552
5	0,2254	0,2102	0,4117	-0,5605	0,2396	-0,0522
6	-0,4435	0,5095	-0,7625	-0,2761	2,4503	-0,8649
7	-0,0051	-0,1892	-0,3455	0,8828	-0,2804	0,1215
8	0,0406	2,4196	-0,4946	0,2372	0,8008	0,4844
9	-2,8211	-0,7269	-0,1039	-0,8246	0,6291	-2,4979
10	-0,398	-7,565	0,1305	1,9957	-4,9322	4,6258

Tabela 31: Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *Full-seg* com 10 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,1	0.6	0,00002983749549	0,3584805480924
0,1	0.7	0,00000957389473	0,12875348578655
0,1	0.9	0,00008473404857	3,794687425545443
0,08	0.9	0,000053342236334	1,50473772075667

Tabela 32: Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *Full-seg* com 20 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,1	0.7	0,000053859659654	0,345856794567233
0,1	0.9	0,000128753485539	0,428753049586537

Tabela 33: Resultados do Treinamento com Validação Cruzada para a Recepção *Full-seg* com 30 Neurônios na Camada Oculta.

Taxa de Aprendizagem	Momento	EQM do Treinamento	EQM na Validação da Estimação
0,1	0.7	0.000050389375487	0,239875843750944
0,1	0.8	0.000049127463758	0,291674632472841

Tabela 34: Características do Ambiente para o Ponto Localizado a 1,534 km.

	Valores Normalizados
Visada Direta	-0,9
Concentração de Prédios	-0,9
Concentração de Árvores	-0,9
Distância	-0,80796

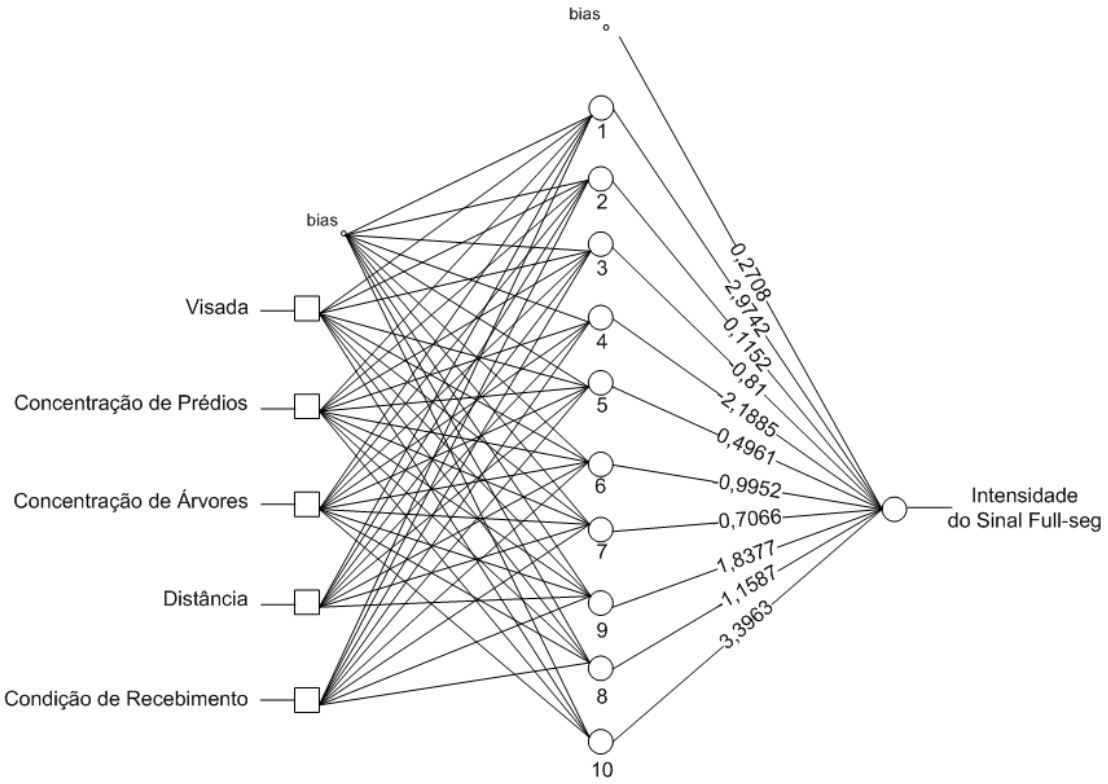


Figura 62: Arquitetura da Rede Neural Obtida após o Treinamento para o Modo de Recepção *Full-seg*.

Para o modo de recepção *one-seg*, a condição de recebimento do ponto localizado a 1,534 km é igual a -0,761397 para um valor de intensidade de sinal é igual a -84,944466 dBm. O valor estimado pela rede neural artificial para essas condições e modo de recepção *one-seg* foi de -85,5827448 dBm, resultando em um erro quadrático médio igual a 0,4073998. Para o modo de recepção *full-seg*, a condição de recebimento do mesmo ponto é igual a -0,58566 para um valor de intensidade de sinal igual a -84,619145 dBm, resultando em um valor de intensidade de sinal igual a -85,5403666 dBm, gerando um erro quadrático médio igual a 0,848649.

5.3 Estimação da Cobertura do Sinal de Televisão Digital

A proposta deste trabalho, além de mostrar a realidade do sinal digital de TV na cidade de Goiânia, é de desenvolver uma ferramenta baseada em RNA capaz de estimar com precisão o valor da intensidade de sinal, em dBm, em um determinado ponto da cidade de Goiânia. O modelo da RNA é baseado em algumas características do ambiente onde o ponto desejado se situa, com o objetivo de estimar um mapa da intensidade de sinal para a cidade de Goiânia a partir de alguns cenários descritos a seguir.

5.3.1 Cenários

Concebeu-se três cenários distintos para a estimação da intensidade do sinal através da MLP treinada na seção anterior. Para cada cenário, gerou-se três mapas de intensidade com diferentes valores de condição de recebimento. São eles: um mapa para a melhor condição de recebimento, um mapa para condição mediana de recebimento e um mapa para a pior condição de recebimento.

Através da ferramenta SIGANATEL, descrita na Seção 2.4, criou-se o mapa de relevo centrado na antena transmissora com raio de 30 km. Esse mapa engloba a região da grande Goiânia. A ferramenta fornece o valor do relevo com passo mínimo de 90 m, ou seja, a partir de um ponto a ferramenta é capaz de fornecer o valor do relevo, em metros, a cada 90 metros. A Figura 63 apresenta o mapa de relevo obtido a partir dos dados fornecidos pela SIGANATEL.

Optou-se por adicionar quatro marcadores para auxiliar na identificação e localização no referido mapa e nos mapas de estimação. O retângulo preto central é a antena transmissora da TV Anhanguera localizada no Morro do Mendanha. Os demais três retângulos pretos representam, de cima para baixo, respectivamente, o prédio da Reitoria da Universidade Federal de Goiás (UFG), o Bloco A

da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC) da UFG e o Morro do Serrinha. A linha preta indica a posição do azimute zero, consequentemente, o norte geográfico.

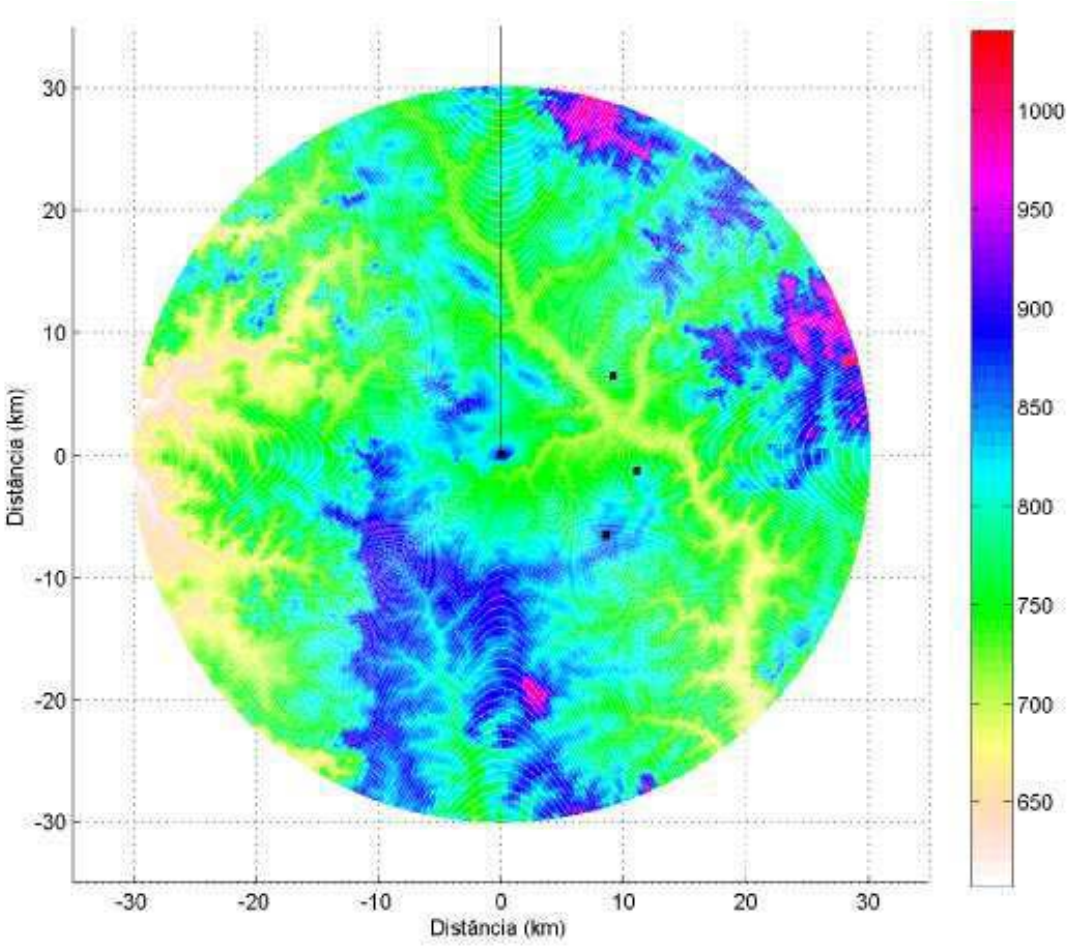


Figura 63: Mapa, Centrado na Antena Transmissora da TV Anhanguera, com os Valores de Relevo em metros.

Nota-se que a localização da antena transmissora no Morro do Mendanha é uma das mais elevadas da cidade de Goiânia. Essa situação favorece a transmissão do sinal digital. Contudo, a região do Mendanha localiza-se próxima à divisão municipal da cidade de Trindade, o que desfavorece a cobertura de algumas regiões da cidade de Goiânia que se encontram do lado oposto.

Para que a estimativa feita pela rede neural tenha a mesma forma do mapa de relevo apresentado na Figura 63, a determinação das entradas da rede neural seguirá um padrão. Existem 360 radiais com origem na antena transmissora e em cada radial existem pontos localizados no passo de 90 m a partir da antena transmissora. Logo, a determinação das entradas iniciará no primeiro passo da primeira radial, até o último passo para então seguir para a próxima radial até completar a varredura das 360 radiais.

O primeiro cenário, denominado cenário A, baseia-se na obstrução da visada direta entre as antenas transmissora e receptora que o relevo pode causar. As entradas da rede neural neste cenário são caracterizadas pela presença ou não de visada direta, dependo da característica do relevo, ausência de concentração de prédios e concentração de árvores, pela variação da distância de 0 a 30 km a partir da antena transmissora e pela condição de recebimento. A rede neural será usada para estimar a intensidade de sinal para essas entradas e para cada passo das 360 radiais.

O segundo cenário, denominado de cenário B, caracteriza-se pela ausência de visada direta, pela presença de concentração de árvores, pela ausência de concentração de prédios, pela variação da distância de 90 m a 30 km a partir da antena transmissora e pela condição de recebimento.

Por último, o terceiro cenário, denominado cenário C, é composto de ausência de visada direta, pela presença de concentração de prédios, pela ausência de concentração de árvores, pela variação da distância de 90 m a 30 km a partir da antena transmissora e pela condição de recebimento. A Tabela 35 fornece as características de cada cenário proposto que serão utilizados para a estimação da rede neural.

Assim, para cada cenário proposto será estimado três mapas de intensidade do sinal, cada um dos mapas será relativo a um valor de condição de recebimento.

5.3.2 Cobertura Estimada

A análise da cobertura estimada será realizada para os dois modo de recepção, iniciando-se pela recepção *one-seg*. Para o Cenário A apresentado na seção anterior, cujas características de entrada estão descritas pela Tabela 35, foram gerados três mapas de estimação da intensidade do sinal, um para cada valor de condição de recebimento. A Figura 64 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal obtido pela rede neural para a pior condição de recebimento, juntamente com os pontos medidos com visada direta e sem visada direta, porém, sem a presença de concentração de árvores ou concentração de prédios.

Analisando o mapa da Figura 64, observa-se que a estimação da rede neural para este cenário é valida para algumas regiões. As estimações realizadas na região localizada à direita dos marcadores estão em discrepância com os valores medidos. Assim, essa região não possui uma estimação válida. O contrário ocorre com a região localizada abaixo do marcador antena, onde nessa região a intensidade estimada do sinal para este cenário coincide com a intensidade do sinal medida em campo, portanto, a região próxima a esse arco é valida.

A Figura 65 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal obtido pela rede neural para o Cenário A com a melhor condição de recebimento. Observa-se que não há uma região bem definida em que a estimação da intensidade do sinal obtida pela rede se aproxima dos valores de intensidade do sinal dos pontos medidos. Logo, esse cenário com a melhor condição de recebimento não é válido para a estimação da intensidade de sinal na grande Goiânia através da rede neural.

Concluindo a análise do Cenário A, a Figura 66 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal para uma condição de recebimento neutra. Analisando o mapa estimado juntamente com os valores de intensidade do sinal dos pontos medidos, constata-se que não há regiões bem definidas em que a estimação se aproxime da intensidade dos pontos medidos. Consequentemente, o Cenário A com uma condição de recebimento neutra não é um padrão válido para estimação,

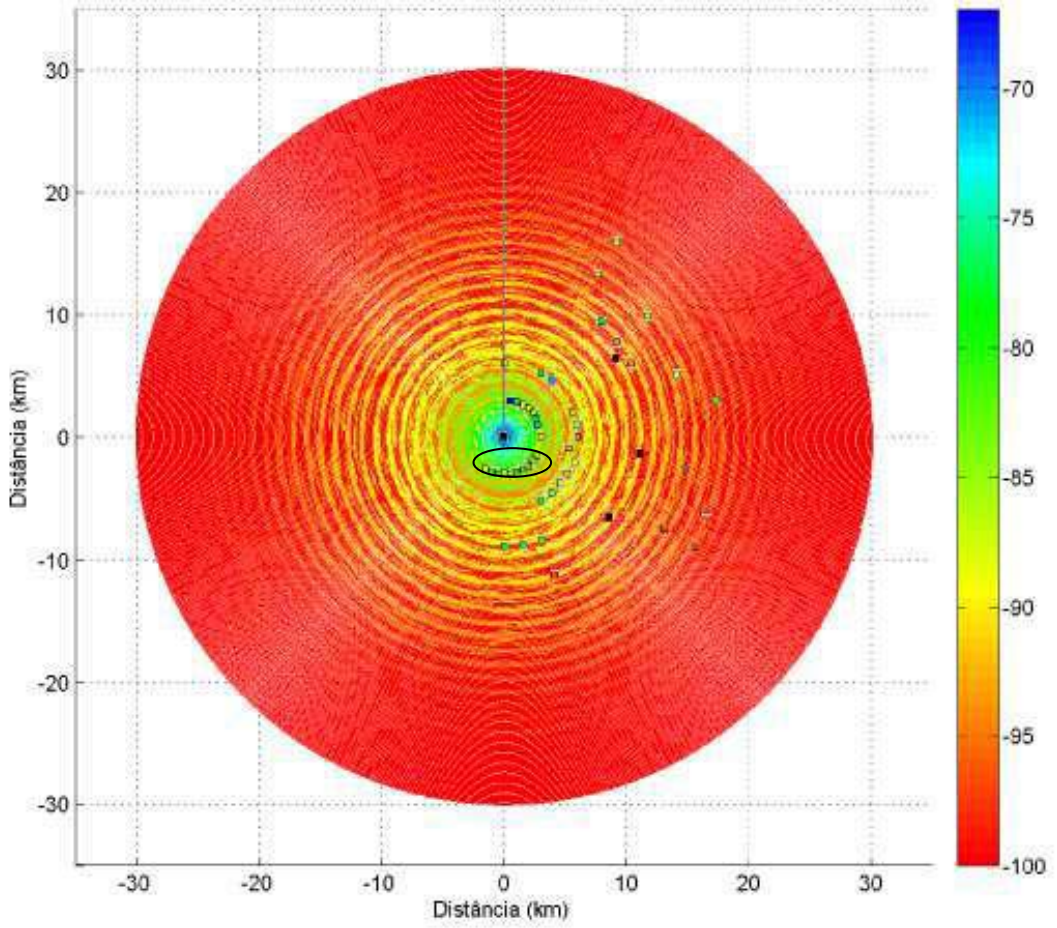


Figura 64: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário A, com a Pior Condição de Recebimento.

pois não há regiões coincidentes.

Para as medidas realizadas, a estimativa para o cenário A com a pior condição de recebimento é a mais apropriada para a realidade da grande Goiânia.

Em seguida será realizada uma análise para o Cenário B, apresentado na Tabela 35, para as três condições de recebimento. A Figura 67 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal para o cenário B com a pior condição de recebimento, juntamente com os pontos medidos onde há concentração de árvore e ausência de visada direta. Analisando a Figura 67 observa-se que a região localizada à direita

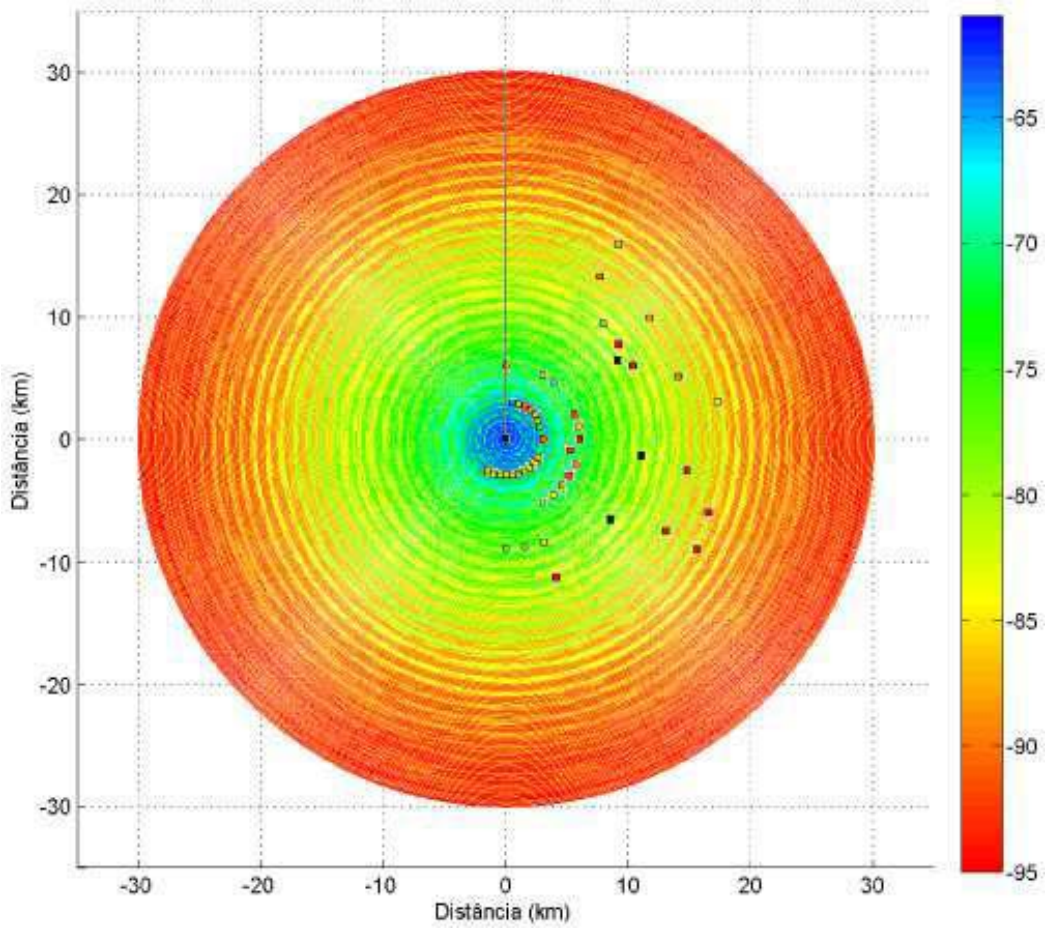


Figura 65: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário A, com a Melhor Condição de Recebimento.

dos marcadores possuem uma estimação de intensidade do sinal próxima, em alguns pontos iguais, dos valores de intensidade do sinal para os pontos medidos, tornando essa região válida para estimação deste cenário com essa condição de recebimento.

A Figura 68 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal para o cenário B com a melhor condição de recebimento. Analisando o mapa estimado e os pontos medidos que se encaixam nas características do cenário B, observa-se que somente a região mais afastada da antena possui uma estimação de intensidade

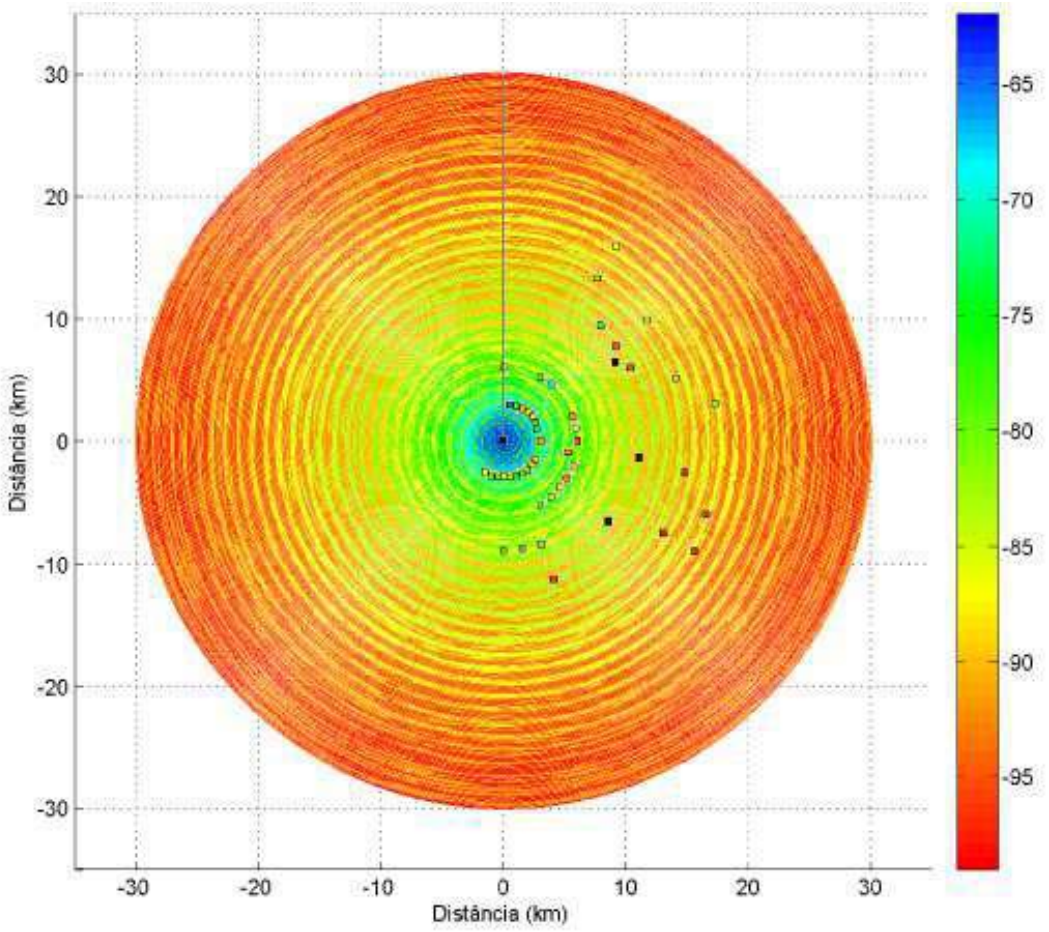


Figura 66: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário A, com Condição de Recebimento Neutra.

do sinal coerente com as intensidades do sinal medidas. Logo, o cenário B para a melhor condição de recebimento é valida apenas para as regiões mais afastadas.

A Figura 69 apresenta o mapa de estimação de intensidade do sinal para o cenário B com uma condição de recebimento neutra e os valores das intensidades dos pontos medidos em que o ambiente se encaixe nas características do cenário B. Comparando as intensidades do sinal estimadas e as intensidades do sinal dos pontos medidos, observa-se que há uma região bem definida em que há coerência entre as intensidades do sinal. Essa região localiza-se radialmente à direita dos

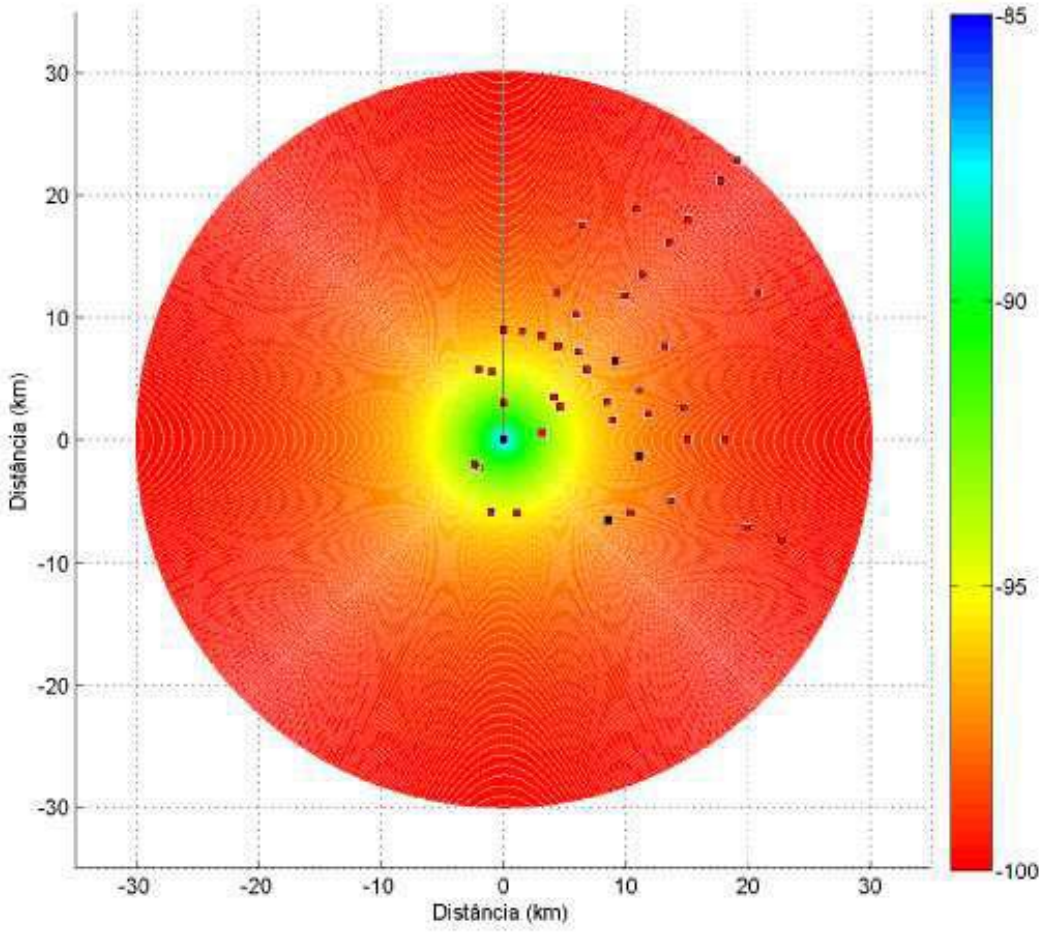


Figura 67: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário B, com a Pior Condição de Recebimento.

marcadores de localidade. Outra região válida encontra-se no arco central do mapa de estimação, região em que a estimação coincide com a intensidade de sinal dos pontos medidos.

A estimação da intensidade do sinal para o Cenário B, para as três condições de recebimento, se mostrou mais próxima da realidade encontrada na cidade de Goiânia comparando com as medições realizadas, consequência da grande presença de concentração de árvores na cidade de Goiânia e redondezas.

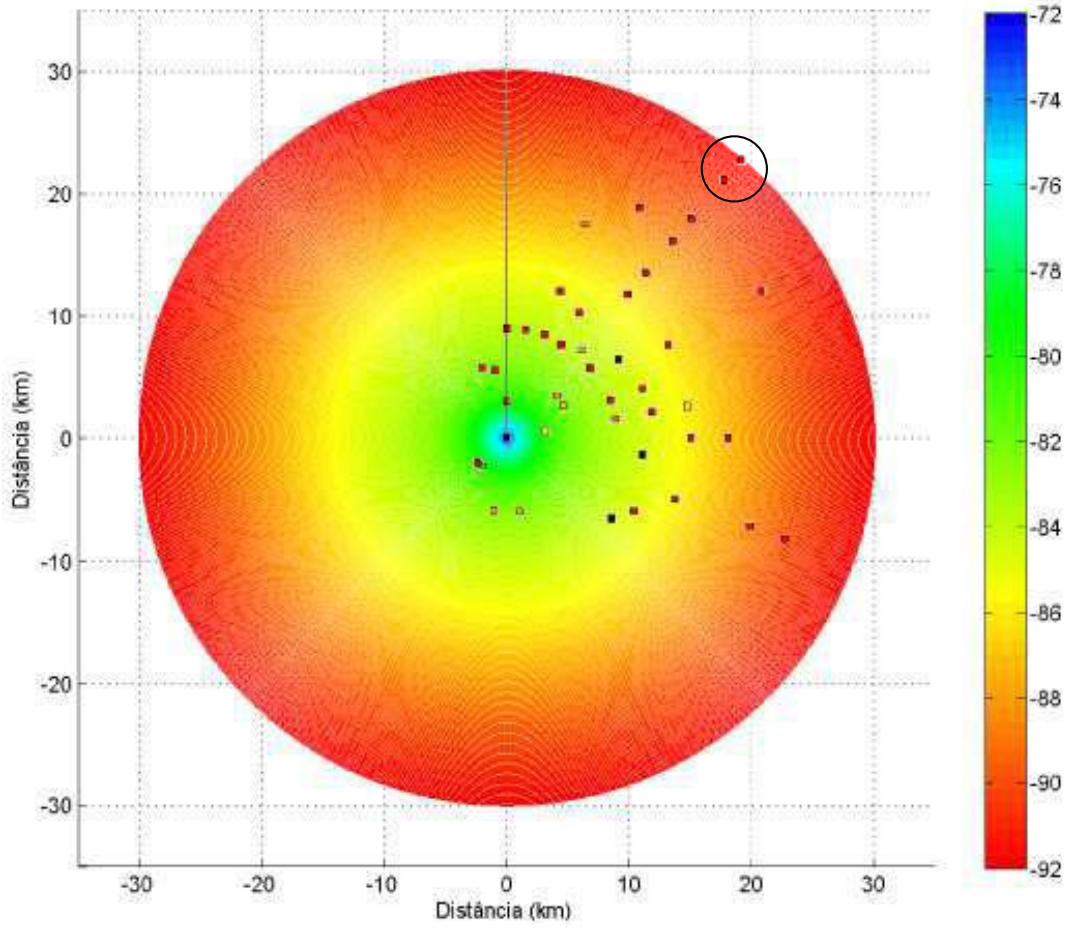


Figura 68: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário B, com a Melhor Condição de Recebimento.

Por fim, são apresentados os resultados encontrados para a estimação de intensidade do sinal para o Cenário C, descrito na Tabela 35, para os três valores de condição de recebimento. A Figura 70 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal para o cenário C com a pior condição de recebimento e os pontos medidos com concentração de prédios e sem visada. Ao analisar a Figura 70, observa-se que há uma região em que há concordância com a intensidade do sinal estimada e a medida. Essa região localiza-se nas redondezas dos marcadores EEEC e Serrinha. Logo, a estimação feita pela rede neural considerando o Cenário C com

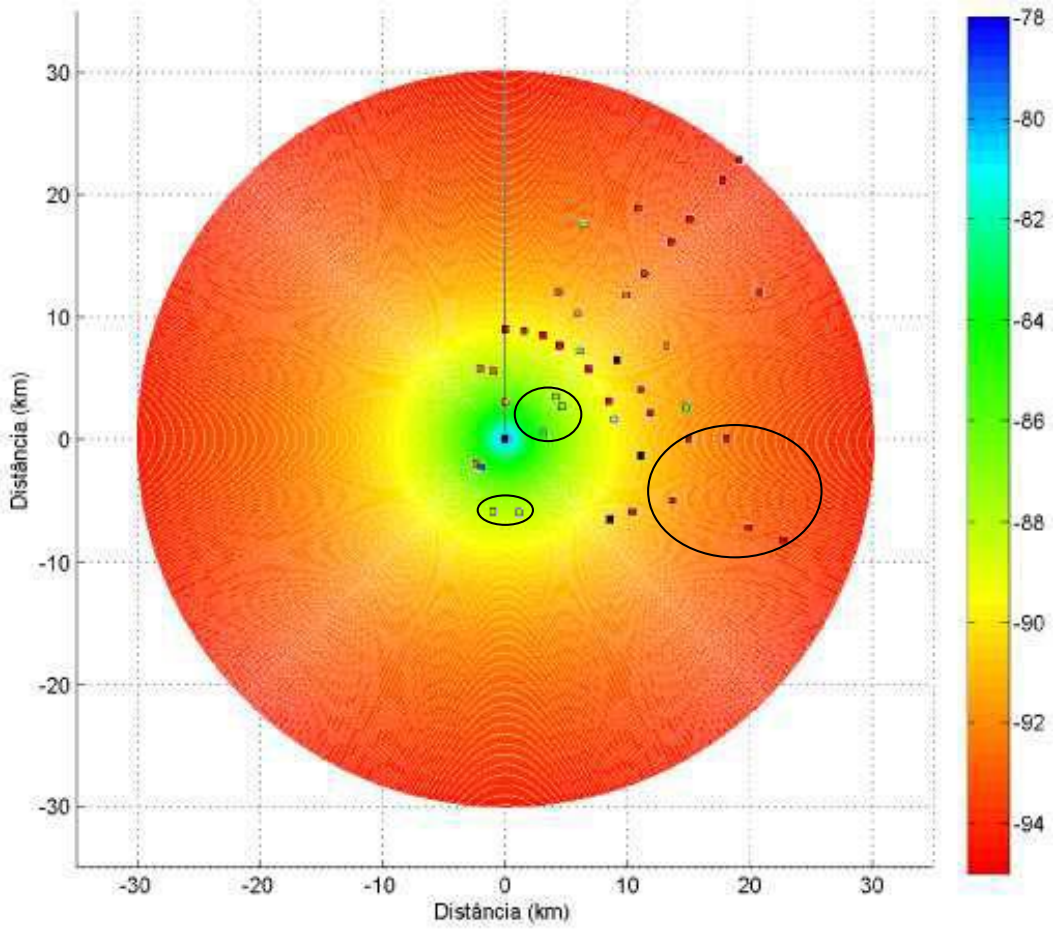


Figura 69: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário B, com Condição de Recebimento Neutra.

a pior condição de recebimento é valida em uma região delimitada e restrita.

A Figura 71 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal estimada para o Cenário C com a melhor condição de recebimento e as intensidades medidas referentes aos pontos medidos em concordância com as características do Cenário C. Observa-se que há uma região delimitada próxima e acima da antena transmissora em que a intensidade do sinal estimada pela rede coincide com a intensidade do sinal obtida através das medições. Logo, há uma região delimitada em que a estimação da intensidade do sinal feita pela rede neural está em concordância com

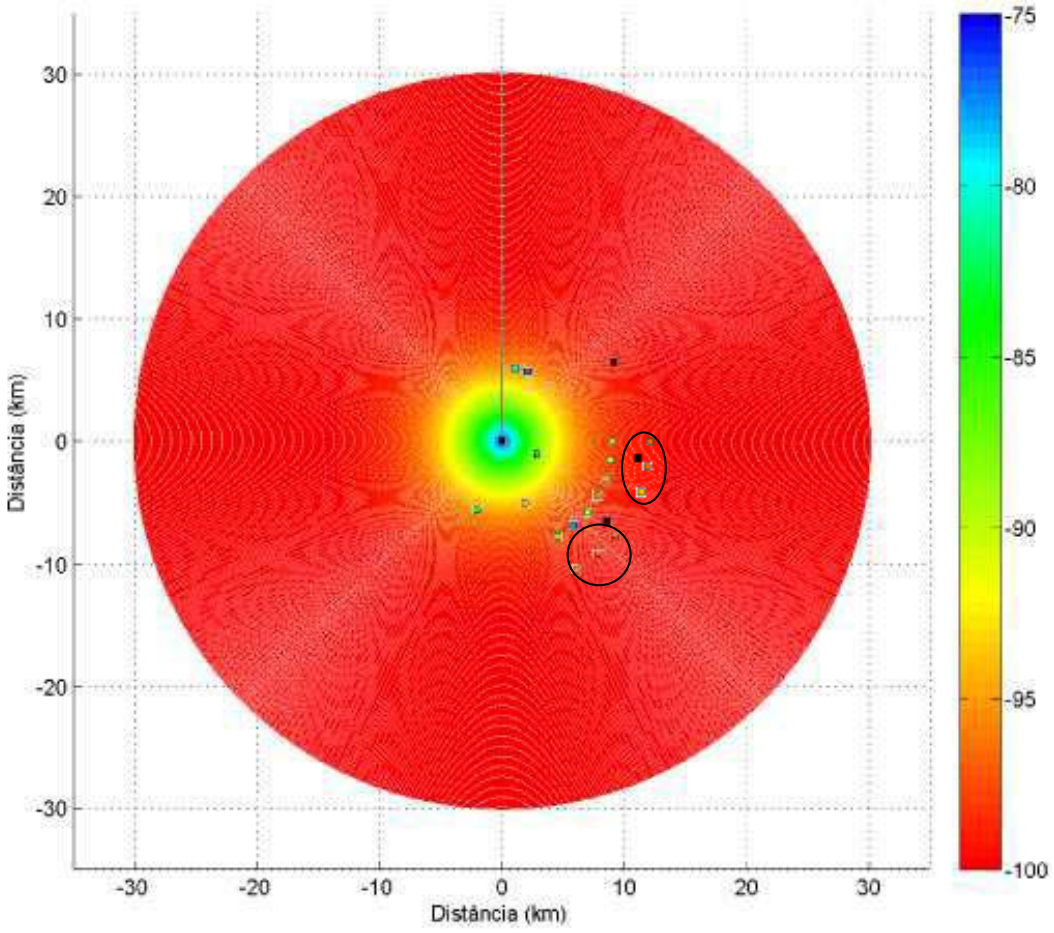


Figura 70: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário C, com a Pior Condição de Recebimento.

as intensidades medidas nessa região.

Finalizando a análise do Cenário C, a Figura 72 apresenta o mapa de estimação da intensidade do sinal para o Cenário C com uma condição de recebimento neutra, juntamente com as intensidades do sinal obtidas nas medições para os ambientes em concordância com o Cenário C. Pela análise do mapa de intensidade, observa-se que não há uma região delimitada em que a intensidade do sinal estimada coincida com a intensidade do sinal medida, porém, há uma região delimitada em que as intensidades do sinal se aproximam. Logo, o Cenário C para uma condição de

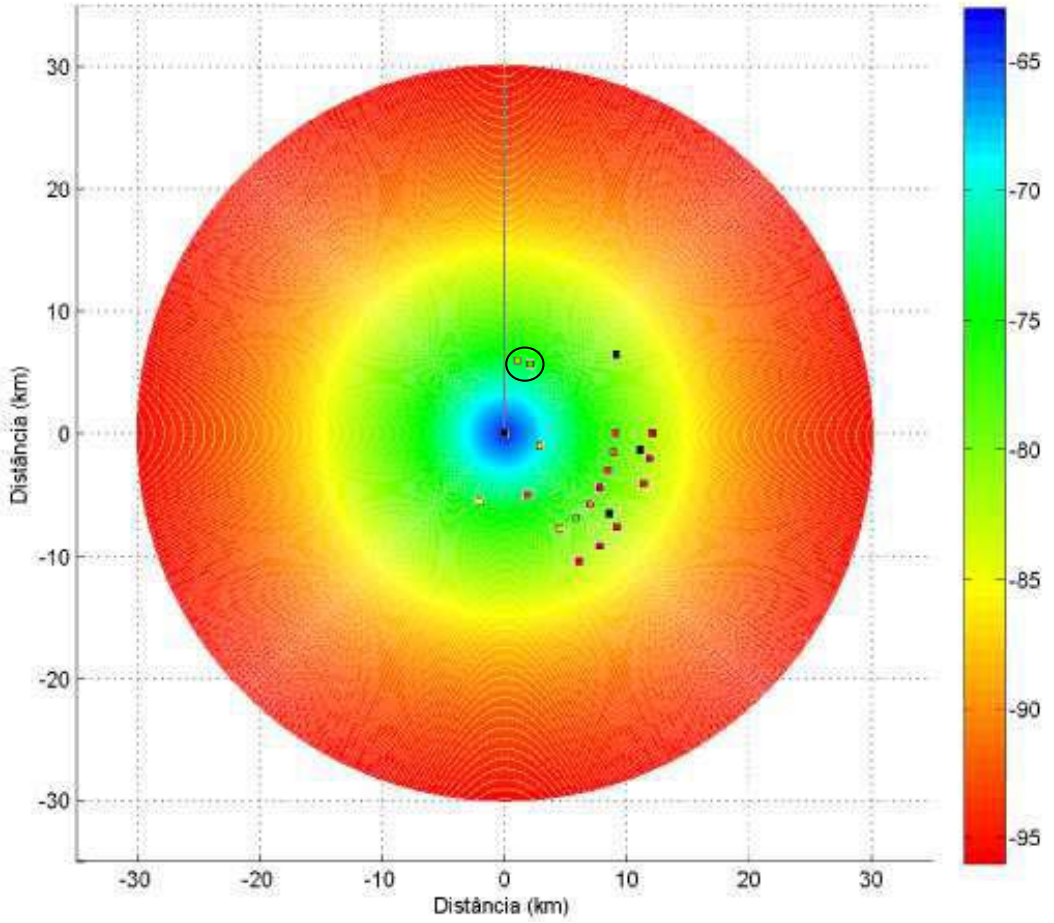


Figura 71: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário C, com a Melhor Condição de Recebimento.

recebimento neutra não possui uma região delimitada em que a intensidade do sinal estimada coincida com a intensidade do sinal medida. Observa-se a presença de uma região a direita dos marcadores em que as intensidades do sinal começam a se aproxima.

No Cenário C, há regiões bem definidas em que a estimativa de intensidade do sinal é valida e coerente com a realidade da cidade de Goiânia. Porém, a estimativa para uma condição de recebimento neutra não é totalmente válida, pois, os valores de intensidade do sinal não coincidem e sim são próximos.

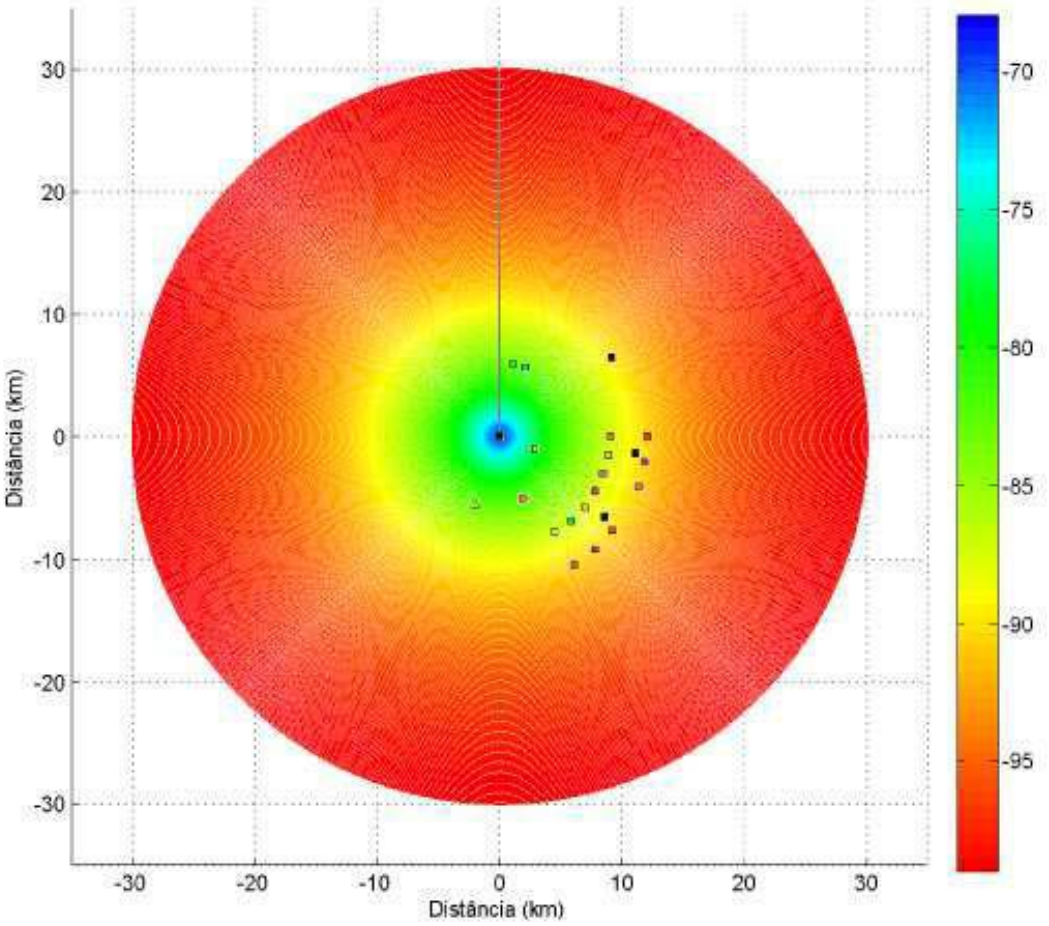


Figura 72: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *One-seg* para o Cenário C, com Condição de Recebimento Neutra.

Interrelacionando os três cenários para a recepção *one-seg*, observa-se que o Cenário A possui a melhor intensidade de sinal e o Cenário C possui a pior intensidade de sinal, para uma mesma condição de recebimento. Tal conclusão está de acordo com o teórico, pois a intensidade do sinal recebido em regiões com concentração de prédios é mais degradada do que em regiões com concentrações de árvores e das regiões em que não há concentração de prédios ou árvores.

Para a recepção *full-seg*, a cobertura estimada da intensidade do sinal é dada como a seguir. Inicia-se pela análise da cobertura do Cenário A. As Figuras 73

à 75 apresentam os mapas de intensidades para as três condições de recebimento (pior, melhor e neutra) para a recepção *full-seg*.

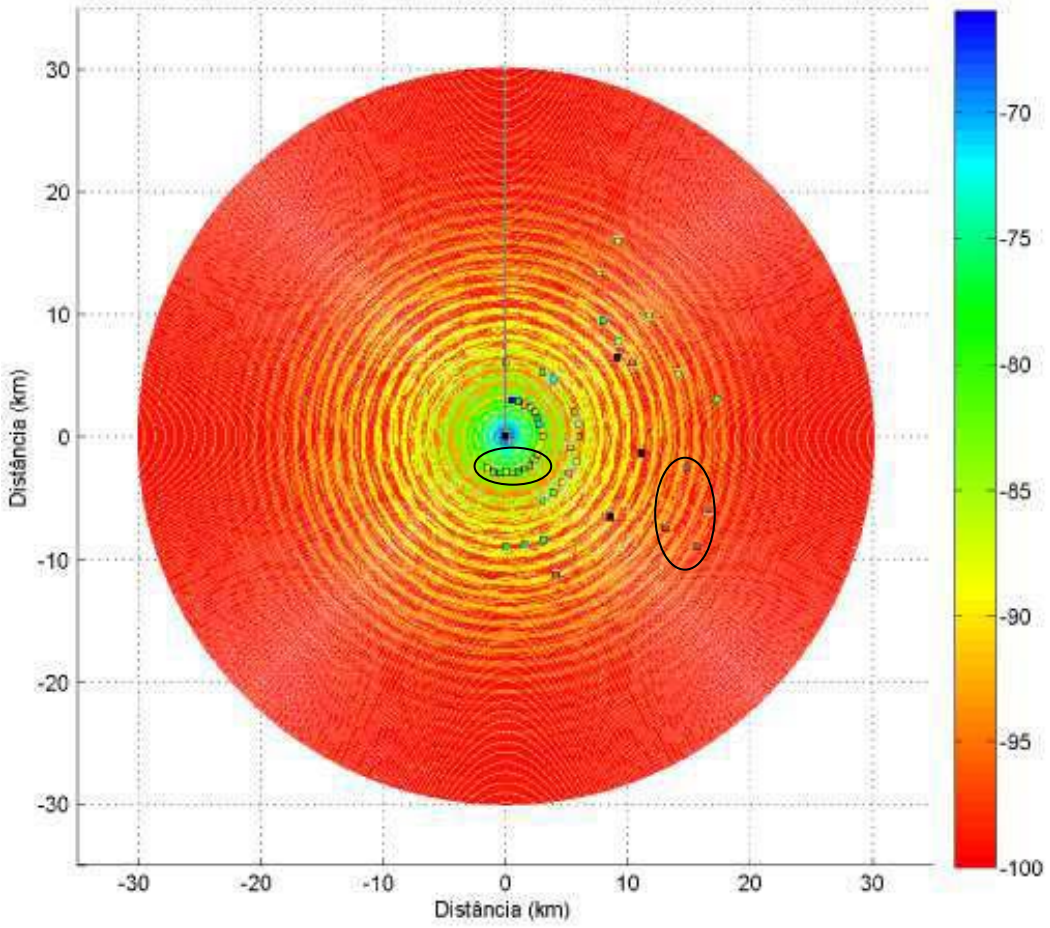


Figura 73: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário A, com a Pior Condição de Recebimento.

Para a pior condição de recebimento, a região localizada abaixo da antena tem uma intensidade de sinal estimada igual ao valor aferido em campo, tornando essa região válida para a estimação com essa condição de recebimento. Outra região de estimação válida concentra-se a direita dos marcadores EEEC/UFG e Morro do Serrinha.

Na melhor condição de recebimento, Figura 74, apenas uma pequena área

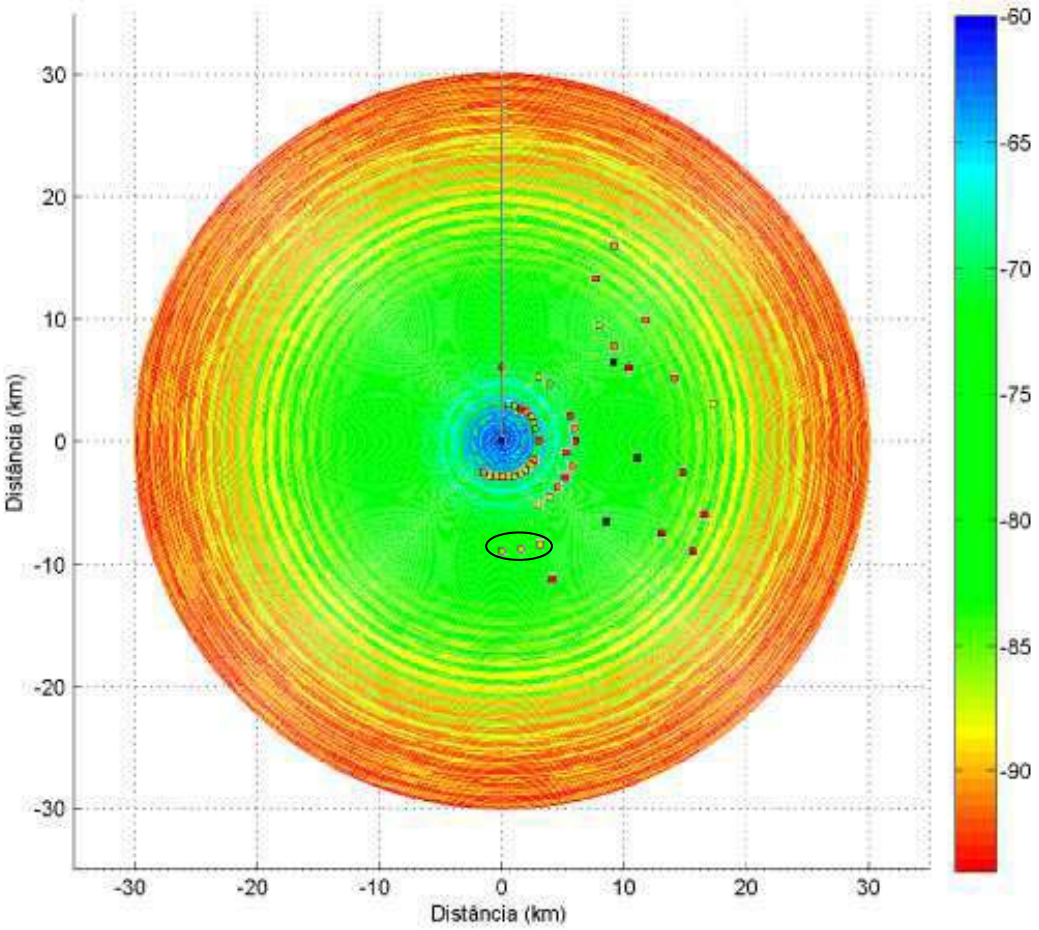


Figura 74: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário A, com a Melhor Condição de Recebimento.

localizada abaixo da antena possui uma intensidade de sinal estimada próxima dos valores aferidos. Logo, essa condição de recebimento não é favorável para a estimação da intensidade do sinal em *full-seg*, pois, apenas uma pequena região teve suas estimativas válidas.

Na condição de recebimento neutra, Figura 75, a estimativa da intensidade de sinal é validada para duas pequenas áreas. Logo, essa condição de recebimento não resulta em estimações próximas da realidade da cidade de Goiânia. Portanto, para o Cenário A apenas a condição de recebimento pior produz resultados significativos

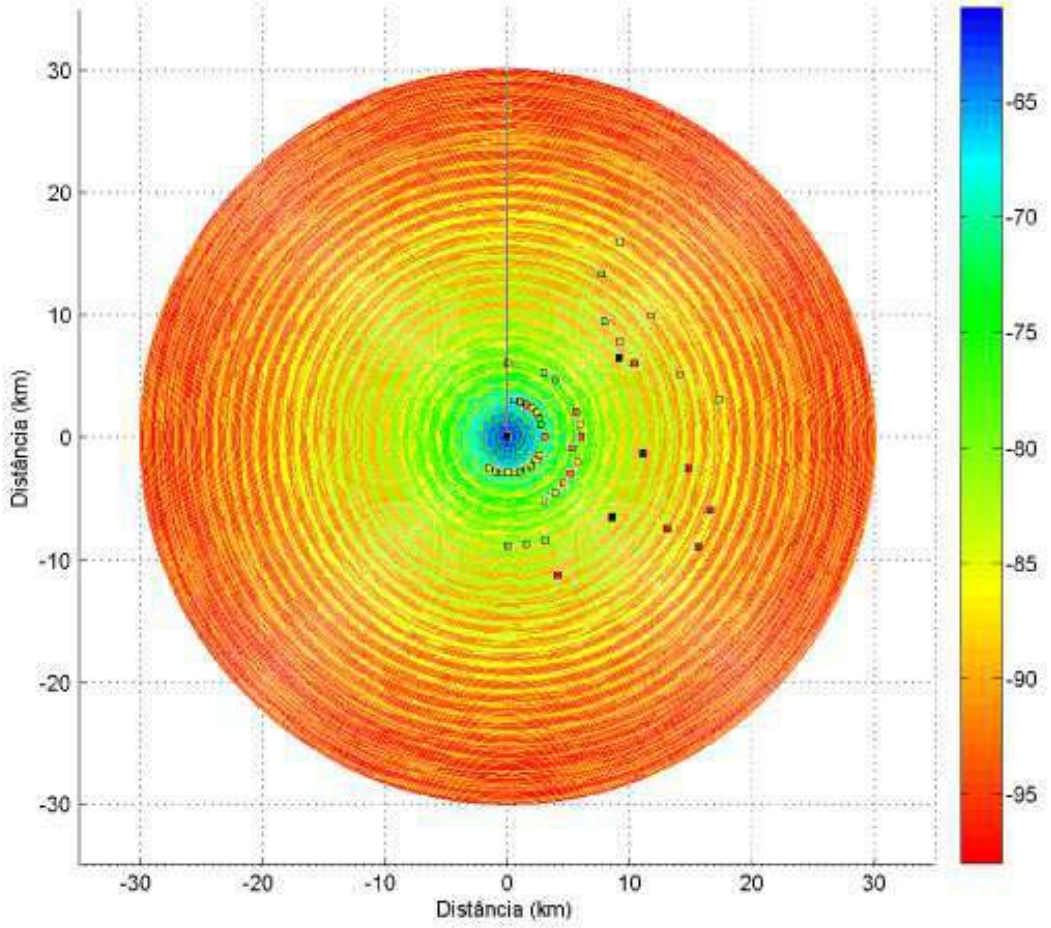


Figura 75: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário A, com Condição de Recebimento Neutra.

e válidos com as medições realizadas.

As Figuras 76 à 78 apresentam os mapas de estimação de intensidade de sinal para as três condições de recebimento para o Cenário B, caracterizado pela presença de concentração de árvores. Analisando os mapas, conclui-se que apenas para a condição de recebimento neutra produz resultados de estimação de intensidade de sinal em concordância com as intensidades de sinal aferidas. As regiões localizadas a direita dos marcadores são válidas para a estimação com essa condição de recebimento nesse cenário específico. Porém, analisando as condições de recebimento

melhor e pior, observa-se que em ambas os resultados estimados não se aproximam das intensidades do sinal aferidas. Logo, para o Cenário B apenas a condição de recebimento neutra produz resultados válidos.

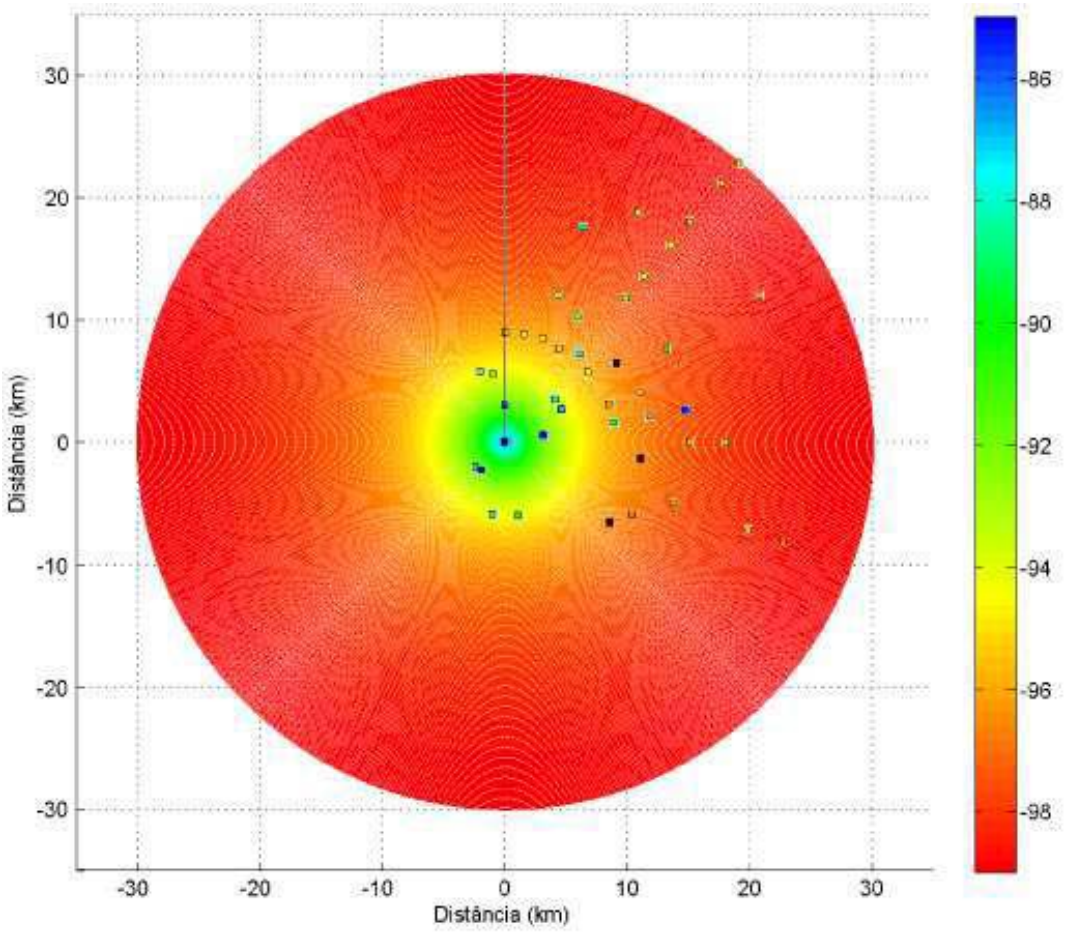


Figura 76: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário B, com a Pior Condição de Recebimento.

Para o último cenário de estimação para a recepção *full-seg*, Cenário C (presença de concentração de prédios e ausência de visada), as Figuras 79 à 81 apresentam os mapas de estimação da intensidade de sinal para as condições de recebimento melhor, pior e neutra. Para a pior condição de recebimento a região a direita dos marcadores representa uma área válida de estimação por concordar com

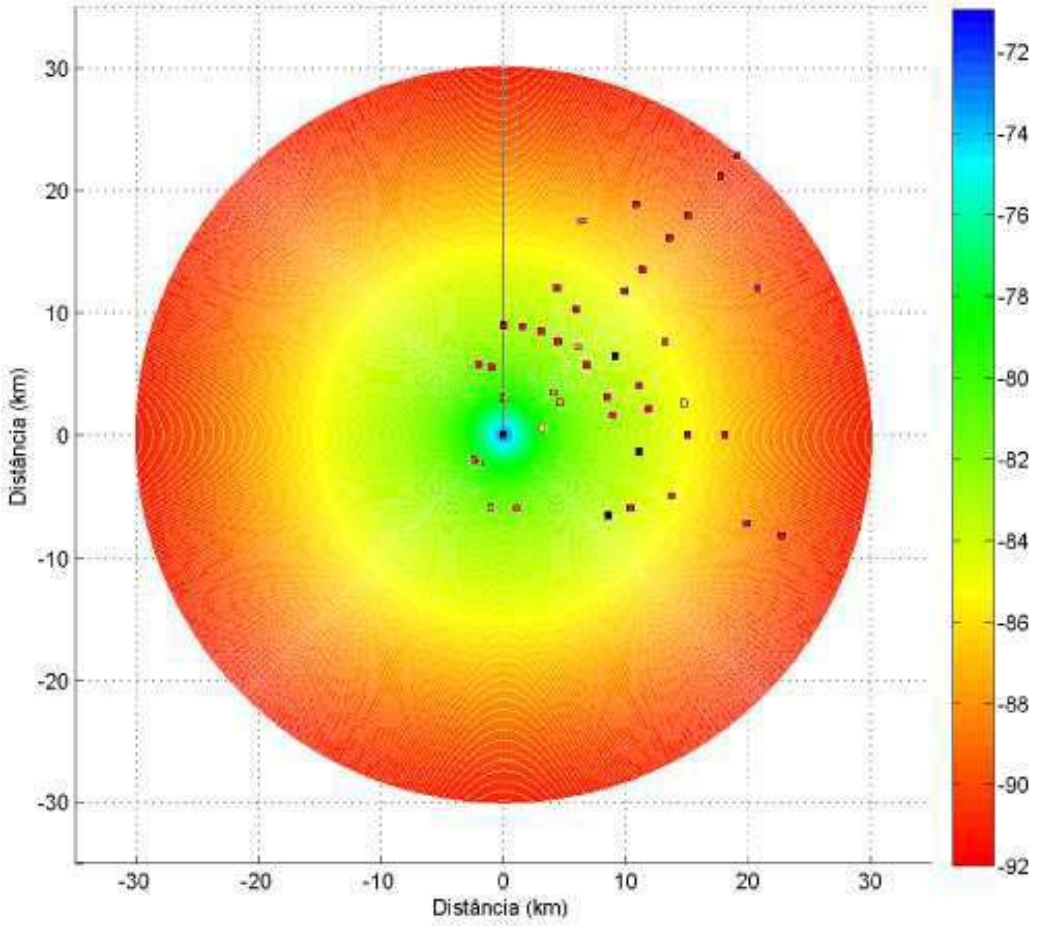


Figura 77: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário B, com a Melhor Condição de Recebimento.

os valores de intensidade do sinal das medições aferidas. Na melhor condição de recebimento não há uma região delimitada em que a estimação da intensidade do sinal esteja coerente com a intensidade do sinal medido. Assim, para este cenário essa condição de recebimento não é válida. A condição de recebimento neutra, produz resultados válidos para a região próxima aos marcadores, localizado a direita dos marcadores de localidade. Concluindo a análise deste cenário, os mapas de estimação da intensidade de sinal com a pior e neutra condição de recebimento possuem regiões delimitadas válidas para a estimação da intensidade do sinal.

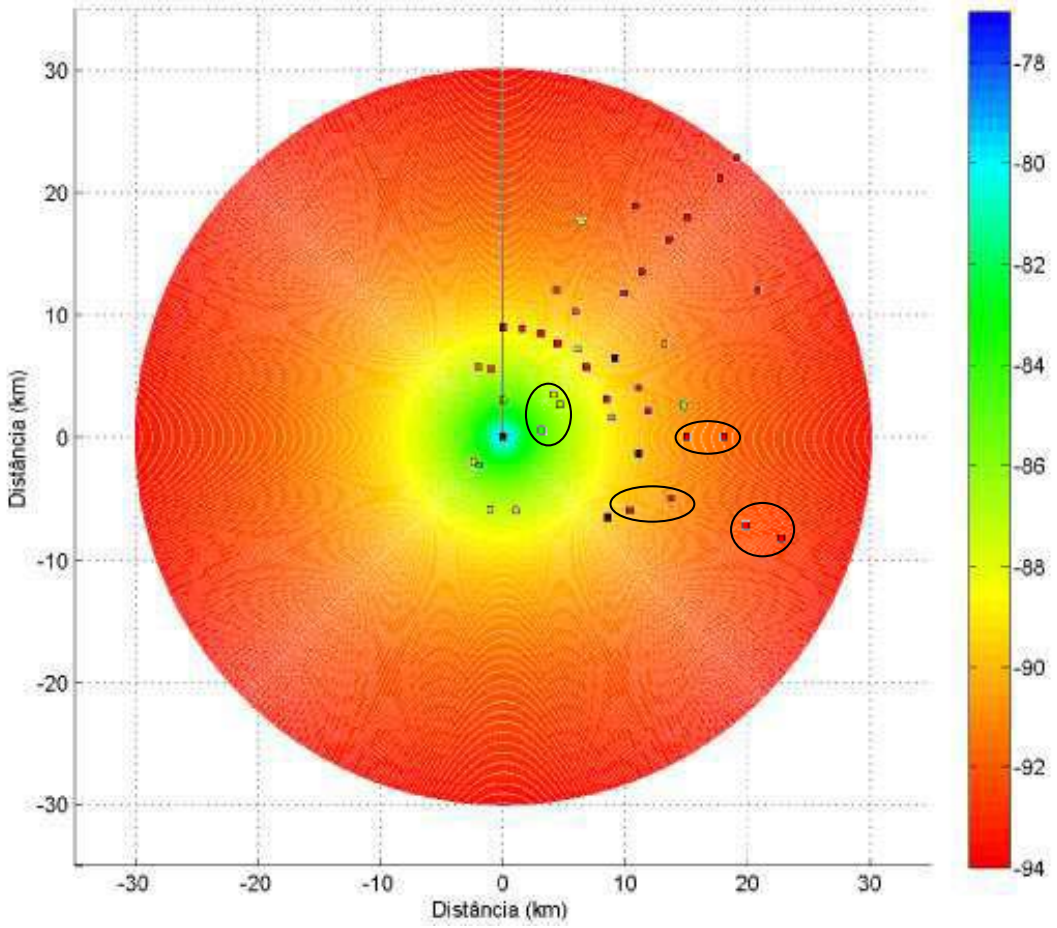


Figura 78: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário B, com Condição de Recebimento Neutra.

Seguindo a mesma linha de desempenho da rede neural e resultados esperados do modo de recepção *one-seg*, o cenário A fornece valores de intensidade do sinal melhores do que o Cenário C. Consequência da presença de concentração de prédios no Cenário C, o que degrada a intensidade de sinal. Analisando um único cenário, nota-se que a intensidade do sinal é degradada de acordo com a condição de recebimento. Assim, o mapa de intensidade do sinal que apresenta o melhor nível de intensidade do sinal é gerado com a melhor condição de recebimento, e o mapa de intensidade do sinal que apresenta o pior nível de intensidade do sinal é gerado com a pior condição de recebimento.

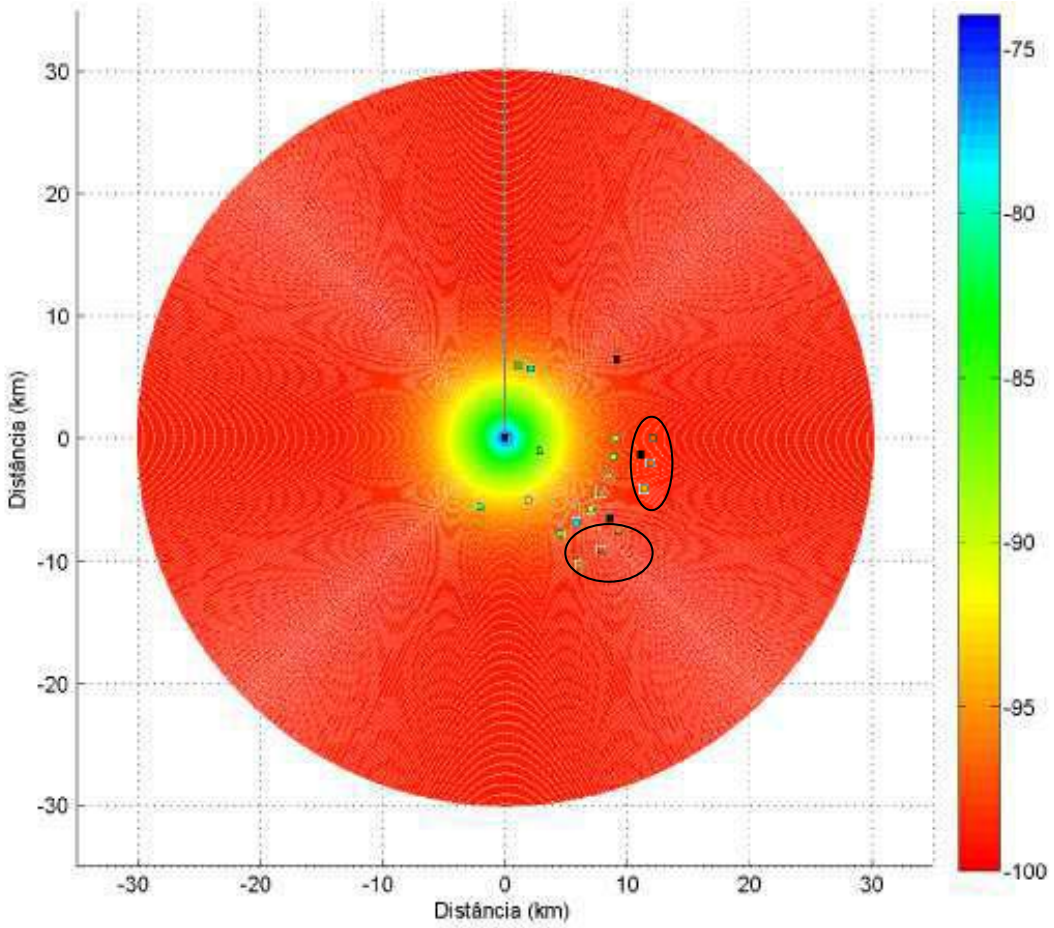


Figura 79: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário C, com a Pior Condição de Recebimento.

Tabela 35: Configurações dos Cenários Propostos para a Estimação pela Rede Neural.

	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Visada Direta	Depende do relevo	Ausência	Ausência
Concentração de Prédios	Ausência	Ausência	Presença
Concentração de Árvores	Ausência	Presença	Ausência
Distância	De 90 m a 30 km	De 90 m a 30 km	De 90 m a 30 km
Condição de Recebimento	Melhor, Neutra e Pior	Melhor, Neutra e Pior	Melhor, Neutra e Pior

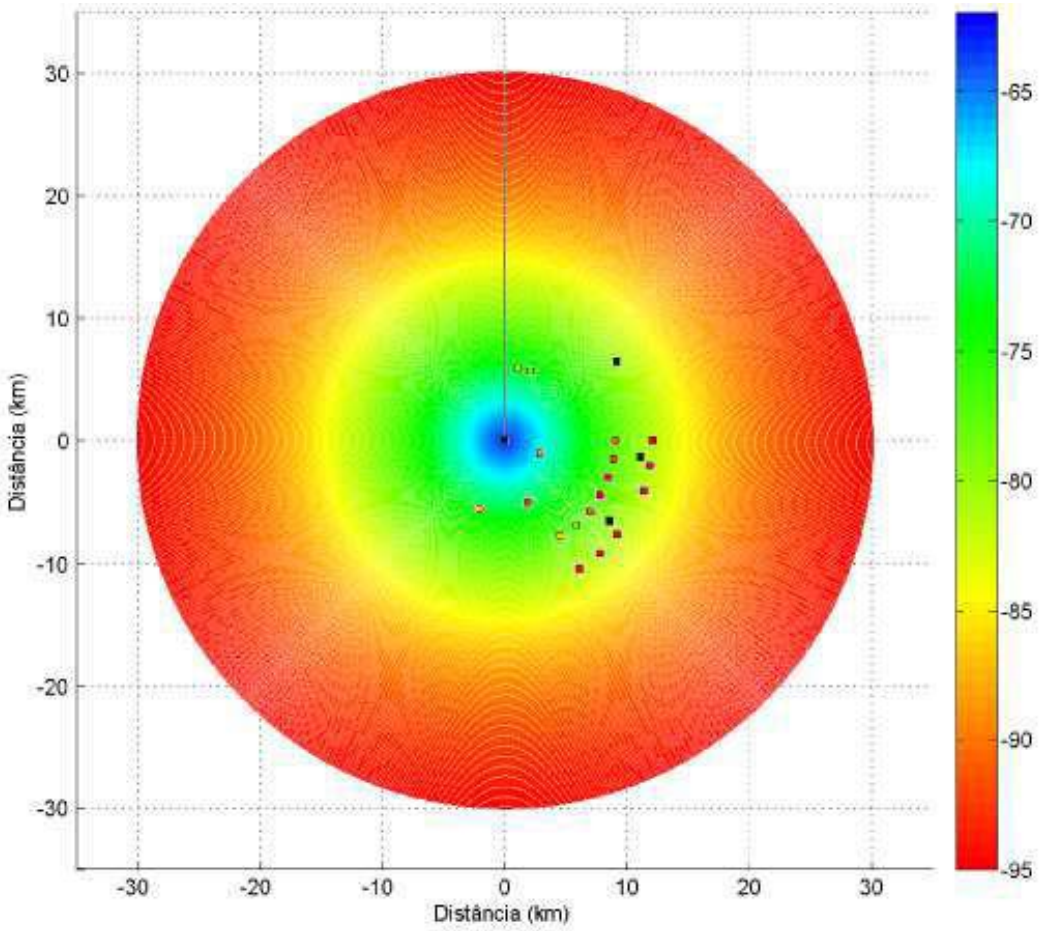


Figura 80: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário C, com a Melhor Condição de Recebimento.

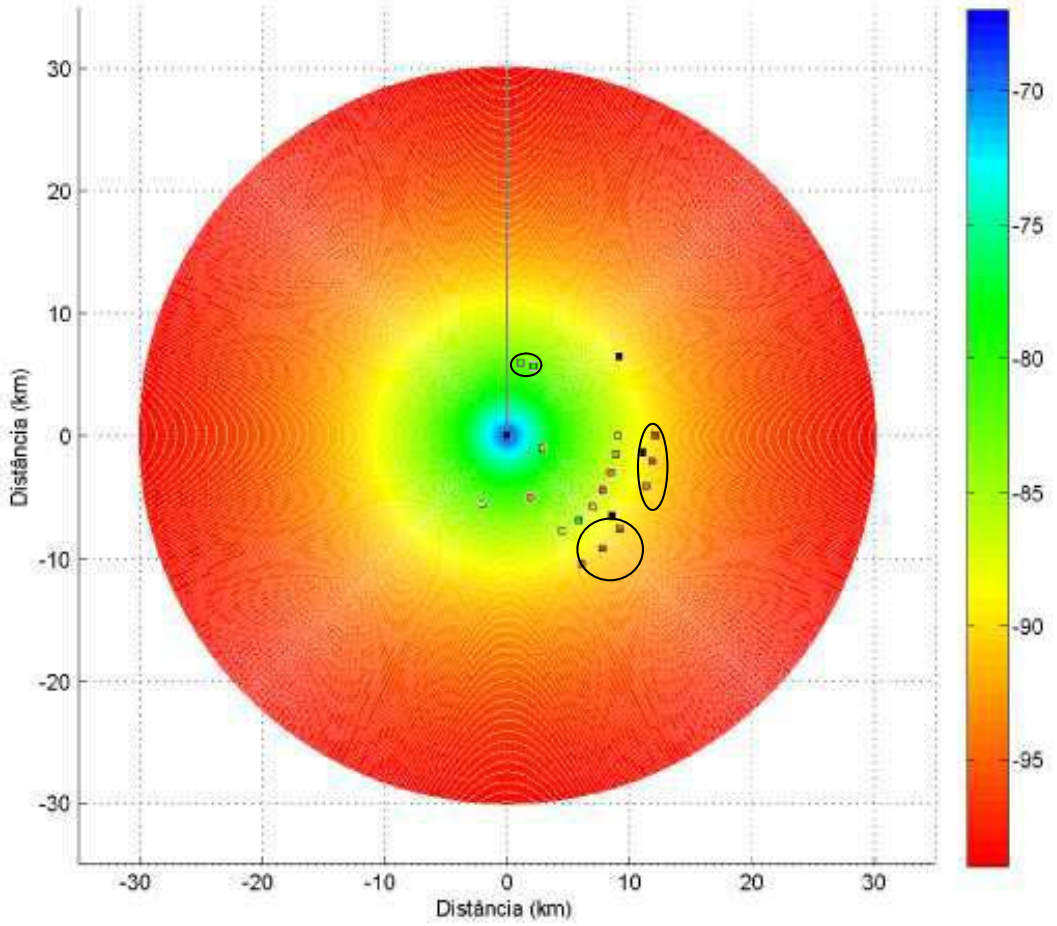


Figura 81: Mapa de Estimação de Intensidade do Sinal em dBm para a Recepção *Full-seg* para o Cenário C, com Condição de Recebimento Neutra.

6 Conclusões

ESTA dissertação apresentou resultados das medições em campo das intensidades de sinal para os modos de recepção *one-seg* e *full-seg*, resguardando as peculiaridades do sinal de TV digital. Também apresentou os resultados de estimação da intensidade de sinal para os modos de recepção *one-seg* e *full-seg* obtidos através da rede neural artificial com arquitetura do perceptron de múltiplas camadas.

Os valores de intensidades de sinal, em dBm, adquiridos na campanha de medidas revelam que o sinal de televisão digital, tanto para o modo de recepção *one-seg* e recepção *full-seg*, encontra-se abaixo dos valores calculados pelos modelos de propagação estudados neste trabalho. Com os dados obtidos na campanha de medidas, realizada neste trabalho, observa-se que a maioria dos valores de intensidade de sinal encontra-se abaixo do limiar mínimo, estabelecido pela norma NBR 15604, para a recepção nos modos de recepção *one-seg* e *full-seg* que é de -77 dBm, o que pode comprometer a recepção.

A rede neural artificial teve sua arquitetura definida através do treinamento realizado com a utilização dos dados de intensidade de sinal obtidos pela campanha de dados. O treinamento resultou em um pequeno erro quadrático médio de treinamento, próximo de 9.10^{-6}. A rede teve seu poder de extrapolação comprovado na seção 5.2.3, o que valida os mapas de coberturas criados no Capítulo 5 para as distância de até 3 km.

A estimacão de intensidade de sinal feita para os cenários propostos, para cada

modo de recepção, resultaram em delimitações de regiões em cada cenário que estão de acordo com as intensidades de sinal obtidas pela campanha de medidas nessas regiões.

Na estimação da intensidade de sinal para a recepção *one-seg*, o cenário A (visada influenciada pelo relevo, ausência de concentração de prédios e árvores) foi validado apenas para a pior condição de recebimento. O cenário B (ausência de visada, ausência de concentração de prédios e presença de concentração de árvores), para as três condições de recebimentos, se mostrou mais próximo da realidade encontrada na cidade de Goiânia ao ser comparada com as medições realizadas, consequência da grande concentração de árvores na cidade. O cenário C (ausência de visada, presença de concentração de prédios e ausência de concentração de árvores) apresentou-se inválido para as estimativas realizadas para a condição neutra de recebimento. Para as outras condições de recebimentos obteve-se regiões delimitadas em que a estimativa estava coerente com os dados medidos.

Para a recepção *full-seg*, a estimação da intensidade de sinal para o cenário A produz apenas resultados significativos e válidos com as medições realizadas na pior condição de recebimento. Para a cenário B, a estimativa é válida apenas para a condição de recebimento neutra. Finalmente, o cenário C teve suas estimativas validadas com as medições realizadas para regiões delimitadas nos mapas de estimação com a neutra e pior condição de recebimento.

Os mapas de estimação de intensidade de sinal gerados para os três cenários, para uma mesma condição de recebimento, revelam que a intensidade de sinal é melhor para o cenário A (cenário em que não há concentração de prédios ou de árvores) e que a pior intensidade de sinal encontra-se no cenário C (cenário em que há concentração de prédios). Assim, nas regiões em que há concentração de prédios o sinal será mais degradado do que regiões em que há concentração de árvores e das regiões em que não há concentração de prédios ou árvores.

6.1 Trabalhos Futuros

Esta dissertação deixa como sugestão para trabalhos futuros:

A determinação de uma ferramenta que forneça de forma simples e prática os valores de distância entre dois pontos e os valores de relevo. E que possibilite também a integração com outros sistemas geográficos, além de forneçer um banco de dados mais preciso do apresentado pelo SIGANATEL.

A realização de campanhas de medições para diferentes tipos de teste e modos de recepções descritos no Relatório ITU-R BT.2035-1 (UNION, 2004).

A utilização de mapas de revelo e uso do solo precisos, que podem ser obtidos através do Sistema Estadual de Estatística e de Informação Geográficas de Goiás (SIEG), para uma melhor caracterização do ponto que terá sua intensidade de sinal estimada pela RNA utilizada neste trabalho.

A determinação de uma nova arquitetura de RNA que englobe outros fatores, que possam ser aferidos, que interfiram na intensidade do sinal de recepção do sinal digital e uma expansão do período de medições com o objetivo de ampliar as características do ambiente que possam ser classificados como entradas da RNA, como exemplo a presença ou não de chuva no instante da medição.

Sugere-se, também, o desenvolvimento de uma ferramenta disponibilizada na Internet em que o usuário fornecerá os valores de entrada da RNA que retornará, ao mesmo, o valor da intensidade de sinal para a recepção digital *one-seg* e *full-seg*.

Desenvolvimento de uma ferramenta baseada em *neuro-fuzzy* para alocação de antenas para rede de frequência única (do inglês: *Single-Frequency Network*).

ANEXO A – Valores da Intensidade de Sinal e Localização dos Sítios Utilizados na Campanha de Medidas

NESTE anexo são fornecidos os valores da intensidade de sinal para os modos de recepção *full-seg* e *one-seg* e a localização de cada sítio aferido na campanha de medidas. As Tabelas 36 à 40 apresentam os valores de intensidade de sinal em dBm para os modos de recepção *one-seg* e *full-seg* para cada sítio aferido na campanha de medição, suas coordenadas geodésicas e a distância entre as antenas. As Figuras 82 à 87 apresentam as ampliações dos quadrantes estipulados na Figura 49 dos sítios medidos na grande Goiânia, cujas intensidades foram apresentadas nas Tabelas 36 à 37.

Os valores apresentados nas tabelas a seguir, foram obtidos através da Equação A.1 para a recepção *full-seg* e da Equação A.2 para a recepção *one-seg* utilizando os dados de intensidade de sinal *versus* frequência. O SA fornece uma tabela com 1001 pontos da frequência inicial até a final. Logo, para a recepção *full-seg* a intensidade do sinal média é calculada pela média aritmética de todos os pontos. Na recepção *one-seg*, a intensidade do sinal média é calculada pela média aritmética dos 72 pontos que fazem parte da faixa de frequência do segmento *one-seg*.

$$E = \sum_{i=1}^{1001} e_i \quad \text{para } \textit{full-seg}. \tag{A.1}$$

$$E = \sum_{i=1}^{72} e_i \quad \text{para } \textit{one-seg}. \tag{A.2}$$

Figura 82: Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q1.

Tabela 36: Características dos Pontos Medidos.

Ponto	Intensidade (dBm) *One-seg*	Intensidade (dBm) *Full-seg*	Coordenadas Geodésica	Distância (km)
1	-89,88761378	-86,2331577	S 16° 38' 14,58" W 49° 20' 39,12"	3,02
2	-86,85954701	-87,71083285	S 16° 36' 37,68" W 49° 20' 40,92"	5,998
3	-95,3325799	-95,30544382	S 16° 35' 02,64" W 49° 20' 37,50"	8,92
4	-65,07398209	-66,35947223	S 16° 38' 16,14" W 49° 20' 25,38"	3,008
5	-79,95816832	-81,7463804	S 16° 36' 40,44" W 49° 20' 05,64"	6,006
6	-94,86705319	-94,74150852	S 16° 35' 05,70" W 49° 19' 49,92"	8,955
7	-80,42332835	-80,15841337	S 16° 38' 19,68" W 49° 20' 09,42"	3,013
8	-77,63835343	-80,7210774	S 16° 36' 49,50" W 49° 19' 31,62"	6
9	-95,07300204	-95,0281288	S 16° 35' 19,38" W 49° 18' 55,02"	8,974
10	-93,36242303	-93,21283899	S 16° 33' 27,30" W 49° 18' 02,46"	12,75
11	-88,52686774	-88,46035994	S 16° 30' 26,34" W 49° 16' 59,16"	18,615
12	-90,29985817	-92,53515283	S 16° 38' 28,20" W 49° 19' 51,78"	2,984
13	-79,66744497	-80,63148893	S 16° 37' 04,50" W 49° 19' 00,12"	5,978
14	-95,08623955	-95,08913309	S 16° 35' 44,70" W 49° 18' 11,52"	8,822
15	-91,99657286	-92,37709693	S 16° 34' 14,40" W 49° 17' 32,04"	11,817
16	-89,44419492	-89,6780365	S 16° 32' 53,70" W 49° 16' 00,36"	15,338
17	-87,14971954	-86,85540297	S 16° 31' 10,92" W 49° 15' 38,76"	18,377
18	-94,04904588	-94,05948326	S 16° 29' 59,46" W 49° 14' 05,04"	21,693
19	-87,78343771	-86,6669326	S 16° 38' 36,72" W 49° 19' 34,74"	3,057
20	-70,67835228	-72,75489858	S 16° 37' 22,08" W 49° 18' 30,84"	6,032

Tabela 37: Características dos Pontos Medidos (continuação).

Ponto	Intensidade (dBm) *One-seg*	Intensidade (dBm) *Full-seg*	Coordenadas Geodésica	Distância (km)
21	-87,1871566	-87,54409286	S 16° 35' 58,80" W 49° 17' 17,58"	9,389
22	-78,03676674	-79,51954361	S 16° 34' 53,16" W 49° 16' 07,26"	12,278
23	-92,3422349	-93,50392234	S 16° 33' 31,92" W 49° 15' 07,14"	15,333
24	-94,09513463	-94,03602033	S 16° 32' 50,28" W 49° 13' 59,34"	17,622
25	-94,783994	-94,75968942	S 16° 31' 09,78" W 49° 13' 04,80"	21,012
26	-96,04553978	-95,99550552	S 16° 30' 04,20" W 49° 12' 19,86"	23,414
27	-94,75354307	-94,78357763	S 16° 28' 17,28" W 49° 10' 56,04"	27,532
28	-95,22477822	-95,17353746	S 16° 27' 42,12" W 49° 09' 47,28"	29,67
29	-86,43686337	-86,05430799	S 16° 38' 47,82" W 49° 19' 22,80"	3,063
30	-87,61316824	-87,72550505	S 16° 38' 12,41" W 49° 18' 13,80"	5,347
31	-96,65327614	-94,33230274	S 16° 36' 38,94" W 49° 16' 59,04"	8,879
32	-94,45348714	-88,37167287	S 16° 35' 42,06" W 49° 15' 30,36"	12,011
33	-87,39033696	-88,37167287	S 16° 34' 09,72" W 49° 14' 25,56"	15,335
34	-78,59953626	-77,37313861	S 16° 39' 06,06" W 49° 19' 12,84"	2,986
35	-86,86552462	-86,90845327	S 16° 38' 15,18" W 49° 17' 46,02"	5,317
36	-94,11817121	-94,24062303	S 16° 36' 39,12" W 49° 14' 50,76"	11,97
37	-92,10597497	-90,64819716	S 16° 36' 08,64" W 49° 13' 04,68"	15,182
38	-96,14403236	-96,09987186	S 16° 33' 33,66" W 49° 08' 55,44	23,945
39	-71,57372647	-73,20650875	S 16° 40' 04,92" W 49° 19' 05,46"	2,86
40	-91,58278554	-92,94487725	S 16° 38' 45,30" W 49° 17' 32,64"	5,959
41	-96,26651938	-96,17855347	S 16° 38' 13,44" W 49° 15' 55,98"	8,986

Tabela 38: Características dos Pontos Medidos (continuação).

Ponto	Intensidade (dBm) *One-seg*	Intensidade (dBm) *Full-seg*	Coordenadas Geodésica	Distância (km)
42	-95,24146842	-95,73016807	S 16° 37' 32,52" W 49° 14' 32,52"	11,745
43	-89,3379225	-89,55332023	S 16° 37' 06,78" W 49° 12' 45,84"	14,982
44	-84,61064399	-83,72534749	S 16° 40' 26,10" W 49° 19' 00,78"	3,146
45	-85,99777091	-87,18694604	S 16° 39' 15,90" W 49° 17' 22,68"	5,99
46	-89,02421519	-90,52576053	S 16° 39' 01,80" W 49° 15' 40,80"	9,037
47	-96,65737249	-96,49133622	S 16° 38' 47,16" W 49° 14' 01,56"	12,012
48	-85,97250597	-85,57203214	S 16° 38' 27,18" W 49° 12' 24,24"	14,959
49	-82,31748896	-82,6726851	S 16° 38' 16,26" W 49° 10' 58,80"	17,511
50	-91,25009368	-91,49664298	S 16° 39' 52,20" W 49° 18' 59,64"	3,008
51	-95,49972919	-93,98495498	S 16° 39' 54,60" W 49° 17' 18,18"	6,015
52	-93,76470648	-90,40131832	S 16° 39' 52,98" W 49° 15' 37,14"	9,009
53	-96,61057825	-96,58564711	S 16° 39' 49,20" W 49° 13' 54,30"	12,056
54	-95,19694988	-95,15354409	S 16° 39' 52,92" W 49° 12' 14,64"	15,009
55	-95,02801385	-94,97370488	S 16° 39' 53,04" W 49° 10' 33,24"	18,014
56	-92,53007285	-90,81117538	S 16° 40' 26,58" W 49° 17' 45,54"	5,306
57	-91,2321596	-92,22025304	S 16° 40' 38,40" W 49° 15' 42,06"	8,973
58	-96,74283867	-96,66448627	S 16° 41' 1,44" W 49° 14' 2,82"	11,99
59	-97,29598377	-97,47991676	S 16° 41' 17,04" W 49° 12' 22,08"	15,013
60	-85,12948518	-87,1416451	S 16° 40' 26,10" W 49° 19' 05,76"	3,006
61	-89,04165246	-87,43543508	S 16° 41' 06,60" W 49° 17' 30,42"	6,09
62	-94,22415319	-94,45977907	S 16° 41' 31,80" W 49° 15' 58,32"	8,916

Tabela 39: Características dos Pontos Medidos (continuação).

Ponto	Intensidade (dBm) *One-seg*	Intensidade (dBm) *Full-seg*	Coordenadas Geodésica	Distância (km)
63	-94,02227749	-94,28790276	S 16° 42' 10,98" W 49° 14' 21,06"	12,036
64	-95,67276529	-95,63234261	S 16° 42' 41,34" W 49° 13' 00,48"	14,599
65	-96,91223559	-96,85705773	S 16° 43' 22,50" W 49° 11' 29,88"	17,599
66	-96,01378143	-95,94383708	S 16° 44' 12,18" W 49° 09' 40,62"	21,131
67	-96,62437462	-96,57945068	S 16° 44' 29,46" W 49° 07' 58,56"	24,14
68	-85,8077303	-86,67046729	S 16° 40' 43,74" W 49° 19' 13,44"	3,034
69	-92,1760409	-92,70516472	S 16° 41' 28,62" W 49° 17' 45,54"	5,979
70	-95,67891454	-95,47603178	S 16° 42' 18,72" W 49° 16' 19,20"	8,964
71	-97,00712796	-97,06134906	S 16° 43' 08,82" W 49° 14' 52,62"	11,956
72	-97,40867976	-97,37440049	S 16° 43' 57,36" W 49° 13' 22,14"	15,023
73	-97,12042816	-97,05332474	S 16° 44' 45,18" W 49° 11' 54,36"	18,011
74	-84,73370561	-85,42665143	S 16° 40' 54,24" W 49° 19' 23,04"	2,987
75	-88,04457207	-89,21667974	S 16° 41' 54,90" W 49° 18' 05,76"	5,94
76	-90,4159462	-90,5184599	S 16 43' 03,54" W 49° 16' 47,52"	9,072
77	-95,84939102	-95,42276344	S 16° 44' 01,50" W 49° 15' 32,04"	11,93
78	-84,36350705	-83,56586189	S 16° 41' 06,60" W 49° 19' 32,88"	3,04
79	-83,90557654	-82,36952085	S 16° 42' 21,84" W 49° 18' 31,98"	5,97
80	-77,94166003	-78,49687046	S 16° 43' 38,16" W 49° 17' 25,14"	9,04
81	-96,68390067	-96,6488228	S 16° 44' 51,54" W 49° 16' 19,14"	12,025
82	-82,07825782	-81,85497074	S 16° 41' 19,14" W 49° 19' 51,42"	3,036

Tabela 40: Características dos Pontos Medidos (continuação).

Ponto	Intensidade (dBm) *One-seg*	Intensidade (dBm) *Full-seg*	Coordenadas Geodésica	Distância (km)
83	-78,09609651	-82,09577387	S 16° 42' 42,30" W 49° 19' 00,06"	6,01
84	-86,78128721	-86,43075426	S 16° 44' 06,36" W 49° 18' 09,00"	9,004
85	-95,74266079	-95,47717263	S 16° 45' 35,28" W 49° 17' 20,04"	12,097
86	-76,98462463	-77,84650722	S 16° 41' 26,46" W 49° 20' 05,82"	3,064
87	-93,89215537	-92,6628603	S 16° 42' 39,00" W 49° 19' 44,94"	5,374
88	-81,0454387	-80,03165133	S 16° 44' 28,32" W 49 18' 57,30"	9,011
89	-96,52065935	-96,4646001	S 16° 45' 52,80" W 49° 18' 02,28"	12,026
90	-85,63332173	-83,42950086	S 16° 41' 28,98" W 49 °20' 23,28"	3,004
91	-87,72486959	-89,48112223	S 16° 43' 07,44" W 49° 20' 04,86"	6,079
92	-76,65882732	-78,45908704	S 16° 44' 42,12" W 49° 19' 48,66"	8,959
93	-86,59178703	-86,2377201	S 16° 41' 28,02" W 49° 20' 46,26"	2,931
94	-77,44725611	-76,92833547	S 16° 44' 45,06" W 49° 20' 39,06"	8,984
95	-80,37524648	-80,37496007	S 16° 41' 29,34" W 49° 20' 58,68"	3,013
96	-87,91912932	-87,85163769	S 16° 43' 04,26" W 49° 21' 22,86"	6,014
97	-82,43617789	-82,20389528	S 16° 41' 25,14" W 49° 21' 15,72"	3,018
98	-84,81982304	-87,01133749	S 16° 42' 56,34" W 49° 21' 51,72"	6,017
99	-86,8533238	-87,60049004	S 16° 41' 17,28" W 49° 21' 31,98"	3,002
100	-79,83337262	-82,21991725	S 16° 41' 07,44" W 49° 21' 46,50"	3,002
101	-91,90277367	-89,16698725	S 16° 40' 59,34" W 49° 22' 01,86"	3,147
102	-93,16274621	-92,15972671	S 16° 36' 46,56" W 49° 21' 50,76"	6,085
103	-92,70598416	-92,56469327	S 16° 36' 50,28" W 49° 20' 40,92"	5,611

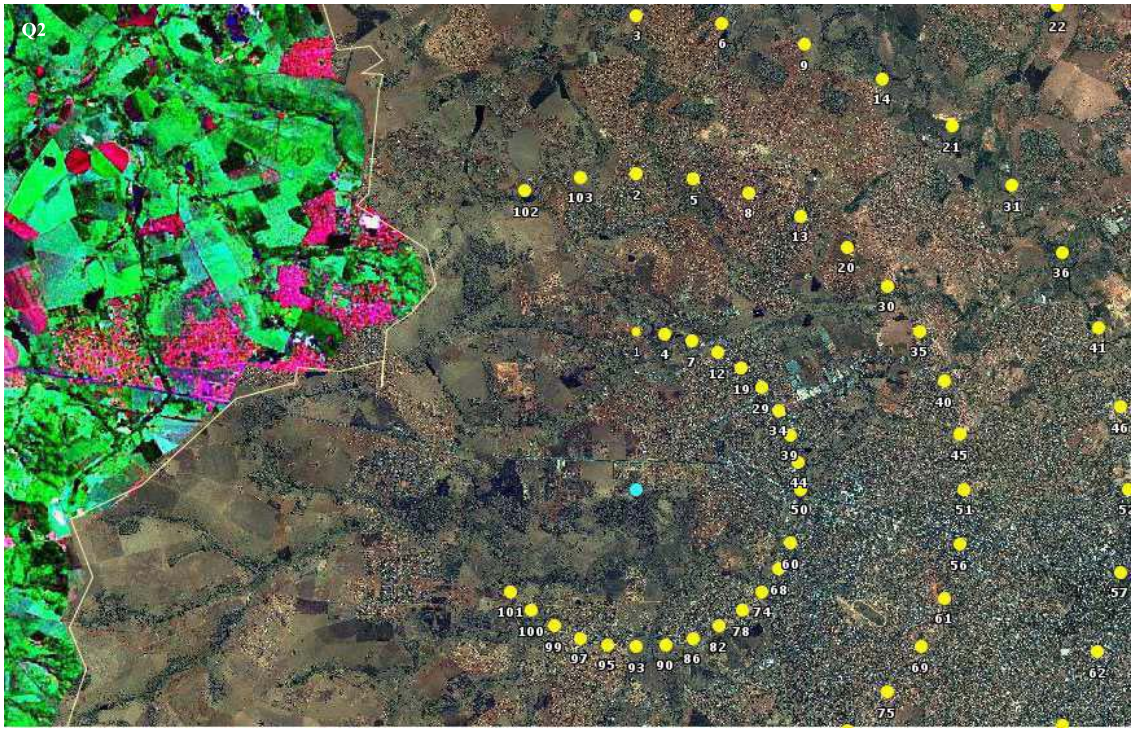


Figura 83: Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q2.

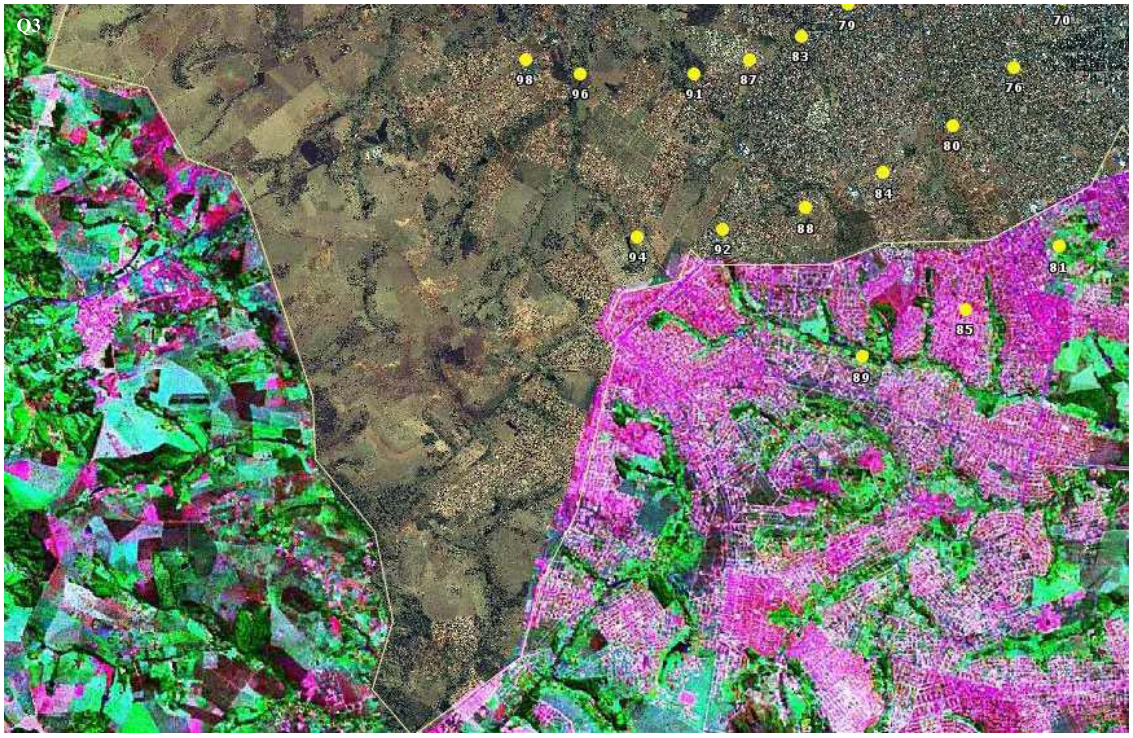


Figura 84: Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q3.

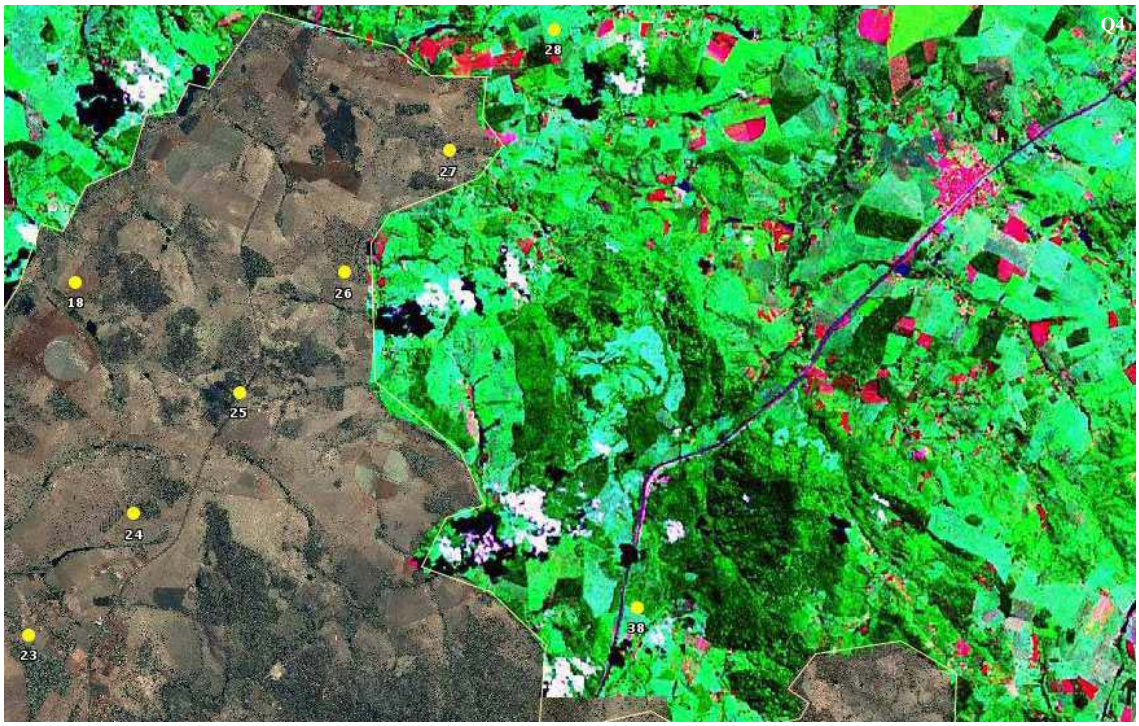


Figura 85: Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q4.

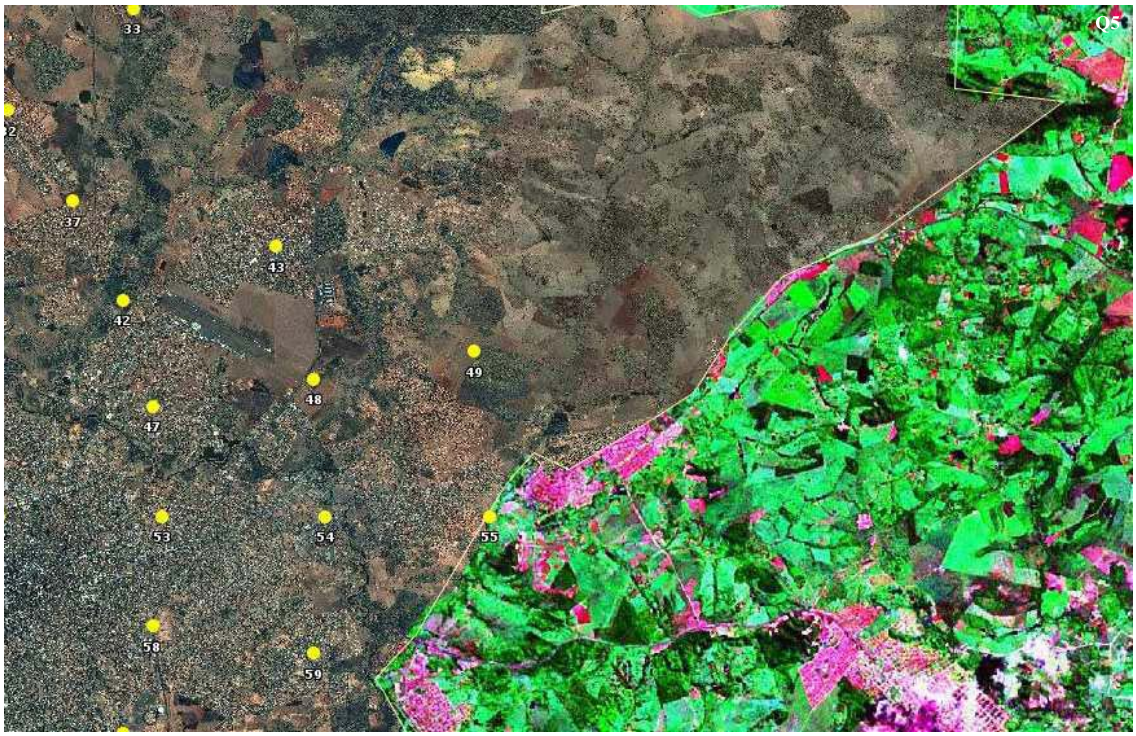


Figura 86: Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q5.

Figura 87: Localização dos Sítios Medição e suas Identificações para o Quadrante Q6.

APÊNDICE A – Algoritmo para Aplicação da Recomendação ITU-R P.1546-1

O algoritmo, apresentado a seguir, apresenta a aplicação do procedimento para previsão ponto-área de serviços terrestres na faixa de frequências de 30 a 3.000 MHz. Ele baseia-se no procedimento de aplicação passo-a-passo apresentado no Anexo 6 da Recomendação ITU-R P.1566-1, com adaptações para as condições da cidade de Goiânia.

A cidade de Goiânia localiza-se na região Centro-Oeste do Brasil, afastada da região litorânea. Consequentemente, o tipo de percurso de propagação a ser adotado, na aplicação da Recomendação, é o terrestre. A partir da definição do tipo de percurso de propagação, o algoritmo para aplicação da Recomendação ITU-R P.1546-1 foi adaptado para a aplicação específica desse tipo de percurso. O algoritmo é descrito a seguir.

Definição das variáveis:
d - Distância
dd - Distância desejada
dni - Distância nominal inferior
dns - Distância nominal superior
h_1 - Altura da antena transmissora/base, em relação à altura média do solo

h_1d - Altura da antena transmissora/base (entre 10 e 3000 metros)
h_1ni - Altura da antena transmissora/base nominal inferior
h_1ns - Altura da antena transmissora/base nominal superior
h_2 - Altura da antena receptora/móvel, em relação a altura do solo
h_a - Altura da antena acima do solo
pt - Porcentagem de tempo
ptd - Porcentagem de tempo desejada
$ptni$ - Porcentagem de tempo nominal inferior
$ptns$ - Porcentagem de tempo nominal superior
R - Altura da antena receptora/móvel de referência, em relação a altura da cobertura do solo ao redor da antena receptora/móvel (valor mínimo de 10 metros)
fq - Frequência
fqd - Frequência desejada (no intervalo de 30 a 3000 MHz)
$fqni$ - Frequência nominal inferior
$fqns$ - Frequência nominal superior

Passos do algoritmo:

1. Determinar as porcentagens de tempo nominais:
   Se $10\% < ptd < 50\% \rightarrow ptni = 10\%$ e $ptns = 50\%$. Necessária a interpolação no tempo apresentada no Passo 8.
   Se $ptd = 10\%$ ou $ptd = 50\% \rightarrow ptni = 10\%$ ou $ptni = 50\%$, respectivamente. Desnecessária a interpolação no tempo apresentada no Passo 8.

2. Determinar as frequências nominais:
   Se $fqd < 600MHz \rightarrow fqni = 100MHz$ e $fqns = 600MHz$. Necessária a interpolação/extrapolação na frequência apresentado no Passo 7.
   Se $fqd > 600MHz \rightarrow fqni = 600MHz$ e $fqns = 2000MHz$. Necessária a interpolação/extrapolação na frequência apresentada no Passo 7.
   Se $fqd = 100MHz$ ou $fqd = 600MHz$ ou $fqd = 2000MHz \rightarrow fqni =$

$100MHz$ ou $fqni = 600MHz$ ou $fqni = 2000Mhz$, respectivamente. Desnecessária a interpolação na frequência apresentada no Passo 7.

3. Determinar as distâncias nominais:
   Se *dd* for igual a um valor da Tabela 41 → este valor será *dni*. Desnecessária a interpolação apresentada no Passo 6 (e).
   Caso contrário → *dni* será o valor imediatamente inferior e *dns* será o valor imediatamente superior. Necessário a interpolação apresentada no Passo 6 (e).

Tabela 41: Valores de distância (km).

1	10	19	60	110	200	425	650	875
2	11	20	65	120	225	450	675	900
3	12	25	70	130	250	475	700	925
4	13	30	75	140	275	500	725	950
5	14	35	80	150	300	525	750	975
6	15	40	85	160	325	550	775	1000
7	16	45	90	170	350	575	800	
8	17	50	95	180	375	600	825	
9	18	55	100	190	400	625	850	

4. Para a porcentagem de tempo nominal inferior:
   $pt = ptni$.

5. Para a frequência nominal inferior:
   $fq = fqni$.

6. Obter a intensidade de campo excedida em 50 % das localidades para uma antena receptora/móvel na altura representativa do obstáculo, R, acima do solo, para a distância e altura da antena transmissora/base exigidas como se

segue:

(a) Determinar as alturas nominais da antena transmissora base:
Se h_1d for igual a um dos valores 10; 20; 37,5; 75; 150; 300; 600; 1200 $\rightarrow$ este valor será h_1ni. Desnecessária a interpolação apresentada no Passo 6(f).
Caso contrário $\rightarrow$ h_1ni será o valor imediatamente inferior e h_1ns será o valor imediatamente superior. Necessário a interpolação apresentada no Passo 6(f).

(b) Para o valor nominal inferior de h_1:
$h_1 = h_1ni$.

(c) Para o valor nominal inferior da distância:
$d = dni$.

(d) Determinar o valor da intensidade de campo excedida em 50 % das localidades para os valores de R, d e h_1, através das tabulações fornecidas pela Anexo à Resolução N 389.

(e) Se houver distância nominal superior, dns, repetir o passo 6 (d) para dns e interpolar as intensidade de campo para a distância da seguinte forma

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf})log(dd/dni)}{log(dns/dni)}, \tag{A.1}$$

onde E_{inf} é a intensidade de campo para dni e E_{sup} é a intensidade de campo para dns.

(f) Se houver altura da antena transmissora/base nominal superior, h_1ns, repetir os passos 6 (c) a (e) para h_1ns e interpolar/extrapolar para h_1

da seguinte forma

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf})\frac{log(h_1 d/h_1 ni)}{log(h_1 ns/h_1 ni)}. \quad (A.2)$$

A intensidade de campo não deve exceder o limite dado abaixo, caso ocorra, limita a intensidade de campo ao seu valor máximo

$$E_{fs} = 106,920 log(dd). \quad (A.3)$$

7. Se houver frequência nominal superior, $fqns$, repetir o passo 6 para $fqns$ e interpolar/extrapolar conforme equação a seguir

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf})log(fq/fqni)}{log(fqns/fqni)}. \quad (A.4)$$

Limitar a intensidade de campo, se necessário, conforme Equação A.3.

8. Se houver porcentagem de tempo nominal superior, $ptns$, repetir os passo 5 a 6 para $ptns$ e interpolar conforme a seguinte equação

$$E = E_{sup}\frac{(Qi(ptni/100) - Qi(ptd/100))}{(Qi(ptni/100) - Qi(ptns/100))} + E_{inf}\frac{(Qi(ptd/100) - Qi(ptns/100))}{(Qi(ptni/100) - Qi(ptns/100))}, \quad (A.5)$$

onde Qi(x) é a função complementar inversa da distribuição normal cumulativa válida para $0,01 \geq x \leq 0,99$. Dada por

$$Qi(x) = \begin{cases} T(x) - E(x), & x \leq 0,5 \\ -T(1-x) - E(1-x), & \text{x} > 0{,}5 \end{cases} \quad (A.6)$$

onde T(x) é dado por $\sqrt{-2ln(x)}$

e

$$E(x) = \frac{[(0,010328T(x) + 0.802853)T(x)]}{[(0,001308T(x) + 0,189269)T(x) + 1,432788]T(x) + 1}. \quad (A.7)$$

9. Correção da intensidade de campo, dB, para a altura da antena recptora/móvel, $h2$, dada por

$$\text{Correção} = \begin{cases} 6,03 - J(v), & \text{para } h_2 < R' \\ Kh_2 log(h2/R'), & \text{para } h_2 \leq R' \end{cases} \tag{A.8}$$

$$R' = \frac{(1000.d.R - 15.h_1)}{(1000.d - 15)} m \tag{A.9}$$

onde $J(v) = [6,9 + 20log(\sqrt{(v - 0,1^2) + 1} + v + 0,1)]$; $v = K_{nu}\sqrt{h_{dif} O_{clut}}$; $h_{dif} = R' - h_2$; $O_{clut} = arctan(h_{dif}/27)$ e $Kh_2 = 3,2 + 6,2log(fqd)$.

10. Correção para percursos curtos urbanos/suburbanos
Se $dd < 15$ km e $h_a - R < 150$ m:

$$\text{Correção} = -3,3(log(fqd))(1 - 0,85log(dd))(1 - 0,46log(1 + h_a - R)). \tag{A.10}$$

11. Se necessário limitar a intensidade de campo resultante ao valor máximo apresentado a seguir

$$E_{fs} = 106,920log(dd). \tag{A.11}$$

APÊNDICE B – Método Okumura-Hata

ESTE apêndice apresenta o método Okumura-Hata. Esse método é válido para comparação com o método ITU-R P.1546-1 para distâncias até 10 km, $h_2 = H_2 = 1,5$ m e $R = 15$ m é dado por(UNION, 2003)

$$E = 69,82 - 6,16.log(f) + 13,82.logH_1 + a(H_2) - (44,9 - 6,55.logH_1)(logd)^b, \quad \text{(B.1)}$$

onde E é a intensidade de campo (dB(μV/m)) para 1 kW e.r.p., f é a frequência (MHz), H_1 é a altura da antena efetiva da estação base, acima do solo (m), entre 30 e 200 m, H_2 é altura da antena da estação móvel, acima do solo (m), entre 1 e 10 m, d é a distância (km).

$$a(H_2) = (1,1.logf - 0,7).H_2 - (1,56.logf - 0,8), \quad \text{(B.2)}$$

onde

$$b = 1 \quad \text{para} \quad d \geq 20\ km, \quad \text{(B.3)}$$

e

$$b = 1 + (0,14 + 0,000187.f + 0,00107.H_1').(log[0,05.d])^{0,8} \quad \text{para} \quad d > 20km, \quad \text{(B.4)}$$

onde $H_1' = \frac{H_1}{\sqrt{1+0{,}000007.H_1^2}}$.

APÊNDICE C – Conversão das unidades dB μV/m em dBm

ESTE apêndice descreve a formulação matemática para a conversão das unidades dBμV/m para dBm. Esse cálculo é valido para antenas de recepção que possuam resistência de 50 Ω. Primeiramente, é necessário a conversão da intensidade de sinal de dBμV/m para dBμV que é realizada de conforme descrito na Equação C.1.

$$E(dB\mu V) = E(dB\mu V/m) + Gr(dBi) - 20.log(f) + 29,8, \tag{C.1}$$

onde E(dBμV) é a intensidade do campo em dBμV, E(dBμV/m) é a intensidade do campo em dBμV/m, Gr(dBi) é o ganho da antena receptora em dBi e f é a frequência em MHz.

A Figura 88 apresenta o circuito elétrico para uma antena de recepção com resistência de 50 Ω.

A tensão (V) é dada por

$$V = \sqrt{PR}, \tag{C.2}$$

onde P é a potência de valor 1 mV e R é a resistência de valor 50 Ω. Logo, a tensão é igual a 0,2236 volts.

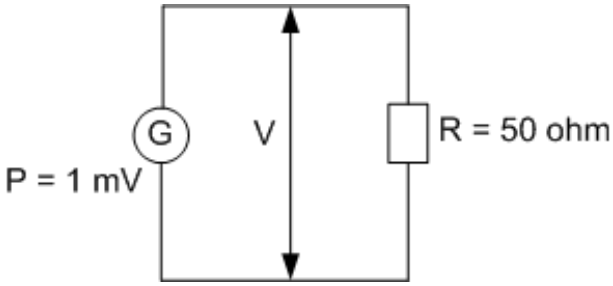


Figura 88: Circuito elétrico da antena de recepção com resistência de 50 Ω.

O valor referente em dBm é dado por

$$dBm = 10.log(\frac{P}{0.001}), \tag{C.3}$$

e o valor referente em dBμV é dado por

$$dBm = 20.log(\frac{V}{0.000001}). \tag{C.4}$$

Desenvolvendo as Equações C.3 e C.4 encontra-se, respectivamente, as Equações C.5 e C.6.

$$dBm = 20.log(V^2) - 10.log(R/0.001), \tag{C.5}$$

$$dBm = 20.log(V^2) - 20.log(0.000001). \tag{C.6}$$

Isolando $20.log(V^2)$ nas Equações C.5 e C.6, pode-se determinar dBm em função dBμV e vice-versa como demonstrado pelas Equações , respectivamente.

$$dBm = dB\mu V - 107, \tag{C.7}$$

e

$$dB\mu V = dBm + 107. \tag{C.8}$$

Referências

CARVALHO, R. M. *Princípios de Comunicações*. Terceira edição revisada. São Paulo: Editorado pelo autor, 2003.

ESTATÍSTICA, I. B. de Geografia e. *Noções Básicas de Cartografia*. 2006. Disponível em: $<http : //www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoes/representacao.html>$. Acesso em: 20 julho 2009.

FAUSETT, L. *Fundamentals of Neural Networks. Architectures, algorithms and applications*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1994.

GARMIN. *GARMIN - eTrex Vista HCx*. 2009. Disponível em: <http://www.garmin.pt/>. Acesso em: 20 junho 2009.

GOIASNET. *Tv Anhanguera entra no Mundo da TV Digital*. 2007. Disponível em: <http://www.goiasnet.com/tvdigital/>. Acesso em: 12 de junho de 2009.

HAYKIN, S. *Redes Neurais, Princípios e prática*. Segunda edição. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HAYKIN, S. *Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais*. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2004.

JURÍDICOS, P. da República Casa Civil Subchefia para A. *Decreto 5.820 - Dispõe sobre a implantação do SBTVD-T, estabelece diretrizes para a transição do sistema de transmissão analógica para o sistema de transmissão digital do serviço de radiodifusão de sons e imagens e do serviço de retransmissão de televisão, e dá outras providências.* Brasília, 2006.

KRAUS, J. *Antennas*. New York: McGraw-Hill, 1989.

RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications, Principles and Practice*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

SKLAR, B. *Digital Communications - Fundamentals and Applications*. Second edition. New Jersey: Prentice Hall, 1988.

TECHNOLOGIES, A. *User's Guide Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A.* USA, january 2009.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15601 - Televisão Digital Terrestre - Sistema de Transmissão.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15602-1 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de vídeo, áudio e multiplexação. Parte 1: Codificação de Vídeo.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15602-2 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de vídeo, áudio e multiplexação. Parte 2: Codificação de Áudio.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15602-3 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de vídeo, áudio e multiplexação. Parte 3: Sistemas de Multiplexação de Sinais.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15603-1 - Televisão Digital Terrestre: Multiplexação e Serviços de Informação (SI). Parte 1: SI do sistema de radiodifusão.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15603-2 - Televisão Digital Terrestre: Multiplexação e Serviços de Informação (SI). Parte 2: Estrutura de dados e definições da informação básica de SI.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15603-3 - Televisão Digital Terrestre: Multiplexação e Serviços de Informação (SI). Parte 3: Sintaxes e definições de informação estendida do SI.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15604 - Televisão Digital Terrestre: Receptores.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15605-1 - Televisão Digital Terrestre: Tópicos de Segurança. Parte 1: Controle de Cópias.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15606-1 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de dados e especificacões de transmissão para radiodifusão digital. Parte 1: Codificação de dados.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15606-2 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de dados e especificacões de transmissão para radiodifusão digital. Parte 2: Cinga-NCL para receptores fixos e móveis - Linguagem de aplicação XML para codificação de aplicações.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15606-3 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de dados e especificacões de transmissão para radiodifusão digital. Parte 3: Especificação de transmissão de dados.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15606-5 - Televisão Digital Terrestre: Codificação de dados e especificacões de transmissão para radiodifusão digital. Parte 5: Ginga-NCL para receptores portáteis - Linguagem de aplicação XML para codificação de aplicações.* Brasília, 2008.

TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 15607-1 - Televisão Digital Terrestre: Canal de Interatividade. Parte 1: Protocolos, interfaces físicas e interfaces de software.* Brasília, 2008.

TELECOMUNICACOES, A. N. de. *Aprova as alterações do Regulamento Técnico para Emissoras de Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada e do Regulamento Técnico para a Prestação do Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens e do Serviço de Retransmissão de Televisão.* Brasília, abril 2005.

TELECOMUNICACOES, A. N. de. *ANATEL cria módulo para Cálculo de Viabilidade de Canais.* Brasília, 2006.

TELECOMUNICACOES, A. N. de. *Descrição do Sistema.* 2007. Disponível em: <http://sistemas.anatel.gov.br/SRD/EmissaoDoc/DescricaoSistema/TV/Tela.asp>. Acesso em: 21 de novembro de 2008.

TERRESTRE, F. do Sistema Brasileiro de T. D. *Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre.* 2008. Disponível em: <http://www.forumsbtvd.org.br>. Acesso em: 25 julho 2009.

TRIMBLE. *GPS Tutorial - All About Gps.* 2009. Disponível em: <http://www.trimble.com/gps/>. Acesso em: 29 junho 2009.

UNION, I. T. *Recomendação ITU-R P.1546-1, Método de Previsões Ponto-área para Serviços Terrestres na Faixa de Freqüência de 30 a 300 MHz.* USA, 2003.

UNION, I. T. *Report ITU-R BT.2035-1 - Guidelines and techniques for the evaluation of digital terrestrial television broadcasting systems.* USA, 2004.

ZUBEN, F. J. V. *Modelos Paramétricos e não-paramétricos de Redes Neurais Artificiais e Aplicações.* Tese (Tese de doutorado), Campinas, fevereito 1996.