



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KAROLINE RODRIGUES LIMA

ESTIMAÇÃO E MAPEAMENTO DO NÍVEL DE POTÊNCIA RECEBIDA DO SINAL
DIGITAL DE TV NA REGIÃO URBANA DA CIDADE DE MOSSORÓ – RN
UTILIZANDO MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

MOSSORÓ

2021

KAROLINE RODRIGUES LIMA

ESTIMAÇÃO E MAPEAMENTO DO NÍVEL DE POTÊNCIA RECEBIDA DO SINAL
DIGITAL DE TV NA REGIÃO URBANA DA CIDADE DE MOSSORÓ – RN
UTILIZANDO MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade, Prof. Dr.

Coorientador: Antônio Sérgio Bezerra Sombra, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2021

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L732e Lima, Karoline Rodrigues.
Estimação e mapeamento do nível de potência recebida do sinal digital de TV na região urbana da cidade de Mossoró ? RN utilizando métodos de interpolação espacial / Karoline Rodrigues Lima. - 2021.
104 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Coorientador: Antonio Sergio Bezerra Sombra.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

1. Campanha de medição da potência do sinal digital. 2. Métodos de interpolação espacial. 3. Modelos de propagação. 4. Potência recebida do sinal digital de TV. I. Andrade, Humberto Dionísio de , orient. II. Sombra, Antonio Sergio Bezerra ,

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KAROLINE RODRIGUES LIMA

ESTIMAÇÃO E MAPEAMENTO DO NÍVEL DE POTÊNCIA RECEBIDA DO SINAL
DIGITAL DE TV NA REGIÃO URBANA DA CIDADE DE MOSSORÓ – RN
UTILIZANDO MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado

Defendida em: 16/12/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – Presidente e orientador (UFERSA – Videoconferência)

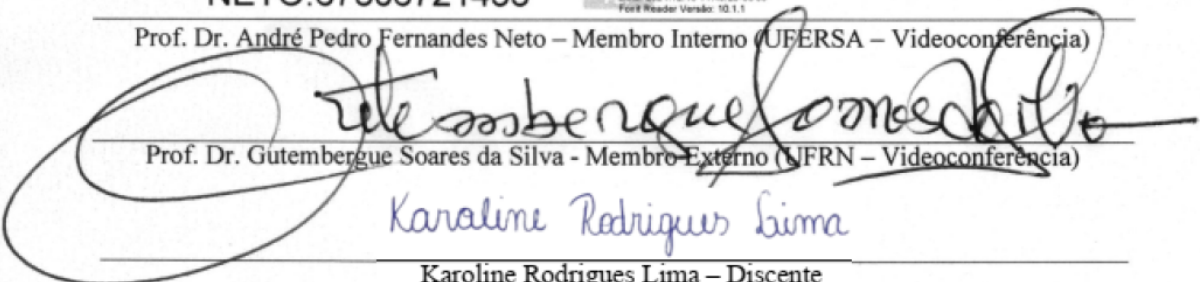


Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra – Coorientador (UFERSA – Videoconferência)

ANDRE PEDRO FERNANDES
NETO:67306721453

Assinado digitalmente por ANDRE PEDRO FERNANDES NETO:67306721453
DN: CN=ANDRE PEDRO FERNANDES NETO:67306721453, OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do
Semi-Árido, O=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, C=BR
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2021.12.16 11:40:28-0200
Font Reader Versão: 10.1.1

Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto – Membro Interno (UFERSA – Videoconferência)



Prof. Dr. Gutemberg Soares da Silva - Membro Externo (UFRN – Videoconferência)

Karoline Rodrigues Lima

Karoline Rodrigues Lima – Discente

À minha mãe Maria Rodrigues Lima (In Memoriam), por todo amor e dedicação, por ter sido a minha melhor professora e me ensinado as lições mais valiosas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador, Humberto Dionísio, por ter acreditado em mim e no meu trabalho. Por ser um dos meus maiores incentivadores na academia. Pela paciência em tirar minhas dúvidas, independente do dia e horário. Por ter se preocupado também com o meu bem-estar durante esta jornada. Finalmente, por ter feito muito mais do que me orientar, por ter trabalhado ativamente comigo, obrigada professor Humberto.

Ao meu coorientador, professor Antônio Sombra, e demais membros da banca examinadora pela disponibilidade e contribuições para melhoria deste trabalho.

À equipe técnica da estação de TV (Canal 47 – Mossoró) pelo material de apoio disponibilizado.

Aos professores Isaac Barros e Matheus Sousa por todo auxílio no processo de medição e por revisarem tão detalhadamente os artigos que desenvolvi a partir desta dissertação. As contribuições de vocês foram especialmente importantes para a concretização e aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço às minhas queridas amigas, Emanuella Rodrigues e Kelianny Lima, que passaram a ser também a minha família de Mossoró-RN. Obrigada por vivenciarem comigo os momentos felizes e também os mais tristes e difíceis, por vibrarem com as minhas conquistas e torcerem pelo meu crescimento.

Ao meu amigo Allan Daniel, com quem eu tenho as conversas mais profundas seja sobre engenharia elétrica ou filosofia de vida. Obrigada por todo carinho que sempre teve comigo, por ter sido tantas vezes uma ótima companhia durante esta etapa da minha vida.

Especialmente, ao meu amigo Wilton Miranda, que é presente na minha vida desde o início da minha graduação. Obrigada por todas as vezes em que você tornou a minha caminhada mais leve. Por sempre se fazer presente me apoiando e incentivando. Por acreditar que eu sou melhor do que vou conseguir ser um dia. Dentre as muitas contribuições que você já fez na minha vida, obrigada por suas contribuições neste trabalho também.

À toda minha família que colabora e torce por mim, em especial, aos meus primos Alfredo Negreiros, Layse Evelyn, Rildo Malveira e Tyciane Rodrigues, que são também meus irmãos, por todo amor e cuidado que sempre tiveram comigo.

O maior agradecimento só poderia ser para minha mãe e melhor amiga, que já não está presente fisicamente, mas viverá para sempre em mim. Eu sei o quanto você estaria orgulhosa de ver se concretizando tudo aquilo que sonhávamos juntas. Registro aqui a minha eterna gratidão por ter me amado incondicionalmente. Por ter investido tudo que podia em mim e, tantas vezes, até o que não podia. Por sempre ter me incentivado a estudar e me presenteado com muitos livros. Por ter mantido a leveza e o bom humor, mesmo enfrentando tantas dificuldades. Por ser a minha maior referência de mulher livre, forte e inteligente, em um mundo que sempre dificultou a vida de mulheres que decidiram ser tudo isso.

“Ninguém realmente começa algo novo, sra. Nemur. Todo mundo constrói em cima das falhas de outros homens. Não existe nada original de verdade na ciência. A contribuição de cada homem à soma de conhecimento é o que conta.”

Daniel Keyes, em Flores para Algernon¹.

¹ KEYES, Daniel. **Flores para Algernon**. São Paulo: Aleph, 2018. p. 224.

RESUMO

O processo de transição do sinal analógico para digital do sistema de televisão aberta ainda está em andamento no Brasil. O desligamento analógico, que iniciou em 2016 na cidade de Rio Verde, no estado de Goiás (GO), tem prazo para finalizar em 31 de dezembro de 2023. A cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte (RN), teve o sinal analógico completamente desligado com o fim da primeira etapa do processo de digitalização do sinal de TV, em 9 de janeiro de 2019. Nesse sentido, o estudo da propagação do sinal digital é de grande relevância para que os radiodifusores possam desenvolver e aperfeiçoar o serviço de transmissão. Este trabalho tem o objetivo de analisar o nível de potência recebida do sinal digital de uma estação de TV na região urbana da cidade de Mossoró – RN. A partir de uma campanha de medição, dados reais da potência do sinal digital foram confrontados com o limiar de recepção de $-77,40$ dBm, estabelecido na norma ABNT NBR 15604:2020 (Televisão digital terrestre – Receptores). Em dois pontos foi constatado que a potência recebida foi menor que o limiar, $-77,83$ dBm e $-77,90$ dBm. A maior atenuação nesses locais pode estar relacionada à maior concentração de obstáculos e aglomerações. A fim de identificar um modelo de propagação mais adequado para o ambiente estudado, os dados coletados foram comparados com estimativas de potência recebida calculadas através de diferentes modelos de propagação. A Recomendação ITU-R P. 1546-6 forneceu as estimativas mais precisas com base nos menores valores de *Mean Absolute Error* – MAE = 6,02 e *Root Mean Squared Error* – RMSE = 7,90. Uma boa representação do nível de potência recebida contribuiu para o mapeamento de maior e menor intensidade do sinal digital na região. Para obter dados contínuos de potência sobre a área de interesse, foram utilizados diferentes métodos de interpolação para gerar mapas de distribuição espacial do sinal digital na região urbana de Mossoró. A implementação dos métodos de interpolação foi realizada no *software Surfer*[®] (Golden Software, LLC), que fornece o relatório de validação cruzada com os valores de *Mean Error* (ME) e RMSE associado a cada método. O menor valor de RMSE (7,6083) indicou que o método Krigagem Ordinária com modelo de variograma exponencial obteve as previsões mais precisas.

Palavras-chave: Campanha de medição da potência do sinal digital. Métodos de interpolação espacial. Modelos de propagação. Potência recebida do sinal digital de TV.

ABSTRACT

The process of transitioning from the analog to the digital signal of the open television system is still in progress in Brazil. The analogue disconnection, which began in 2016 in the city of Rio Verde, in the state of Goiás (GO), is due to end on December 31, 2023. The city of Mossoró, in the state of Rio Grande do Norte (RN), had the analog signal completely turned off with the end of the first stage of the TV signal digitization process, on January 9, 2019. In this sense, the study of digital signal propagation is of great importance so that broadcasters can develop and improve the transmission service. This work aims to analyze the digital signal received power level of a TV station in the urban region of the city of Mossoró – RN. From a measurement campaign, real digital signal power data were compared with the reception threshold of -77.40 dBm, established in the ABNT NBR 15604:2020 (Digital Terrestrial Television – Receivers) standard. At two points it was found that the received power was lower than the threshold, -77.83 dBm and -77.90 dBm. The greatest attenuation in these places may be related to the greater concentration of obstacles and agglomerations. In order to identify a more suitable propagation model for the studied environment, the collected data were compared with received power estimates calculated using different propagation models. Recommendation ITU-R P. 1546-6 provided the most accurate estimates based on the lowest values of Mean Absolute Error – MAE = 6.02 and Root Mean Squared Error – RMSE = 7.90. A good representation of the received power level contributes to the mapping of greater and lesser intensity of the digital signal in the region. To obtain continuous power data over the area of interest, different interpolation methods were used to generate spatial distribution maps of the digital signal in the urban region of Mossoró. The implementation of the interpolation methods was performed in Surfer[®] software (Golden Software, LLC), which provides the cross validation report with the Mean Error (ME) and RMSE values associated with each method. The lowest RMSE value (7.6083) indicated that the Ordinary Kriging method with exponential variogram model obtained the most accurate predictions.

Keywords: Digital signal power measurement campaign. Spatial Interpolation Methods. Propagation models. TV digital signal received power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema básico de comunicação	8
Figura 2 – Refração de ondas de rádio utilizando (a) o raio real da Terra e (b) o fator k para aumentar o raio real da Terra.....	17
Figura 3 – Onda eletromagnética incidente com (a) polarização do campo E paralela ao plano de incidência e (b) polarização do campo E normal ao plano de incidência.....	18
Figura 4 – Modelo de reflexão no solo de dois raios.....	20
Figura 5 – Onda plana passando, da esquerda para a direita, através de uma fenda.....	21
Figura 6 – Zonas de Fresnel	22
Figura 7 – Atenuação mediana relativa ao espaço livre para um terreno quase plano.....	30
Figura 8 – Fator de correção para diferentes tipos de terreno	31
Figura 9 – Fator de correção da altura da antena de transmissão	31
Figura 10 – Fator de correção da altura da antena de recepção.....	32
Figura 11 – Exemplo de um dos gráficos disponíveis na Recomendação ITU-R P. 1546-6 ...	36
Figura 12 – Porcentagem de domicílios com conversor digital	42
Figura 13 – Porcentagem de domicílios com conversor digital recebendo sinal digital	42
Figura 14 – Proposta de Nipkow patenteada na Alemanha em 1884.....	43
Figura 15 – Aparelho de televisão Baird, que está no Museu da Ciência em Londres	45
Figura 16 – Um dos receptores <i>Telefunken</i> utilizados na primeira demonstração de TV no Brasil.....	46
Figura 17 – Estrutura da televisão de transmissão terrestre	50
Figura 18 – Estrutura básica do sistema de televisão analógico.....	51
Figura 19 – Estrutura básica do sistema de televisão digital.....	52
Figura 20 – Distribuição dos padrões de televisão digital no mundo.....	54
Figura 21 – Parâmetros do variograma.....	67
Figura 22 – Modelos básicos de variograma	68
Figura 23 – Fluxograma da metodologia adotada	71
Figura 24 – Estação transmissora de TV digital (canal 47) em Mossoró - RN.....	72
Figura 25 – Modelo da antena transmissora.....	73
Figura 26 – Diagrama de radiação no plano horizontal da antena transmissora	74
Figura 27 – Equipamentos do sistema de medição: (a) analisador de espectro; (b) antena de recepção; (c) GPS	74

Figura 28 – Distribuição dos pontos de medição	76
Figura 29 – Pontos de medição na área urbana de Mossoró – RN	76
Figura 30 – Sistema de medição da potência recebida do sinal digital de TV	77
Figura 31 – Janela para definir o método de interpolação para a grade de dados	78
Figura 32 – Dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV em função da distância na área urbana da cidade de Mossoró-RN.....	80
Figura 33 – Comparação do modelo de propagação do Espaço Livre com os dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV	82
Figura 34 – Comparação do modelo de propagação Hata com os dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV.....	83
Figura 35 – Comparação do modelo de propagação da Recomendação ITU – R P. 1546-6 com os dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV	85
Figura 36 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método Inverso Ponderado da Distância	87
Figura 37 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o Método de Shepard Modificado	88
Figura 38 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método de Curvatura Mínima.....	89
Figura 39 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método Função de Base Radial: (a) <i>Multiquadric</i> ; (b) <i>Inverse Multiquadric</i> ; (c) <i>Multilog</i> ; (d) <i>Natural Cubic Spline</i> ; (e) <i>Thin Plate Spline</i>	91
Figura 40 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método Krigagem Ordinária e modelo de variograma: (a) Linear; (b) Exponencial; (c) Esférico; (d) Gaussiano	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de radiofrequências (continua).....	12
Tabela 2 – Faixas de radiofrequências para televisão	59
Tabela 3 – Tipos de função de base radial.....	65
Tabela 4 – Especificações técnicas da linha de transmissão	73
Tabela 5 – Especificações técnicas da antena de transmissão.....	73
Tabela 6 – Configuração do analisador de espectro	75
Tabela 7 – Pontos em que a potência recebida do sinal digital ultrapassou o limiar de recepção	81
Tabela 8 – Avaliação do modelo de propagação do Espaço Livre.....	82
Tabela 9 – Avaliação do modelo de propagação do Hata	84
Tabela 10 – Avaliação do modelo de propagação da Recomendação ITU-R P. 1546-6	85
Tabela 11 – Avaliação dos modelos de propagação.....	86
Tabela 12 – Validação Cruzada para o método de interpolação Inverso Ponderado da Distância.....	88
Tabela 13 – Validação Cruzada para o Método Shepard Modificado.....	89
Tabela 14 – Validação Cruzada para o método de interpolação Curvatura Mínima.....	90
Tabela 15 – Validação Cruzada para o método de interpolação Função de Base Radial.....	92
Tabela 16 – Validação Cruzada para o método de interpolação Krigagem Ordinária	94
Tabela 17 – Validação Cruzada dos métodos de interpolação	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4G	Quarta Geração de telefonia móvel
ABERT	Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
ASI	<i>Asynchronous Serial Interface</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
BBC	<i>British Broadcasting Corporation</i>
BST-OFDM	<i>Band Segmented Transmission – Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
BTS	<i>Broadcast Transport Stream</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
DASE	<i>DTV Application Software Environment</i>
DIBEG	<i>Digital Broadcasting Experts Group</i>
DTMB	<i>Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting</i>
DTMB-A	<i>DTMB – Advanced</i>
DTV	<i>Digital Television</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>
DVB-T2	<i>Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial</i>
EAD	Entidade Administradora do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
Embratel	Empresa Brasileira de Telecomunicações
ERP	<i>Effective Radiated Power</i>
EURO-COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
FDM	<i>frequency division multiplexing</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
<i>fem</i>	Força Eletromotriz
GIRED	Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV
GIS	<i>Geographic Information System</i>

GO	<i>Geometric Optics</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTD	<i>Geometrical Theory of Diffraction</i>
HCI	Altura do Centro de Fase do Sistema Irradiante
HDTV	<i>Higt Definition Television</i>
HEVC	<i>High Efficiency Video Coding</i>
HNMT	Altura do centro de irradiação da antena transmissora em relação ao nível médio do terreno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial</i>
ISDB-T _B	<i>Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial version B</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>ITU – Radiocommunication Sector</i>
ITU-T	<i>ITU – Telecommunication Standardization Sector</i>
ITU-D	<i>ITU – Telecommunication Development Sector</i>
ITU-R P.	<i>ITU-R Radiowave Propagation</i>
LDM	<i>Layered Division Multiplexing</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-Check</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MC	Ministério das Comunicações
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
ME	Ministério da Economia
ME	<i>Mean Error</i>
MHP	<i>Multimedia Home Platform</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
MSM	<i>Modified Shepard’s Method</i>
NHK	<i>Nippon Hoso Kyokai</i>
NLOS	<i>None Line of Sight</i>
NOM	<i>Non-Orthogonal Multiplexing</i>
NTSC	<i>National Television System Committee</i>

nuQAM	<i>Non-Uniform Quadrature Amplitude Modulation</i>
PAL	<i>Phase Alternating Line</i>
PBTVD	Plano Básico de Distribuição de Canais de Televisão Digital
PCS	<i>Personal Communications Services</i>
PE	<i>Parabolic Equation</i>
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNBL	Programa Nacional de Banda Larga
RF	Radiofrequência
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RTV	Retransmissão de Televisão
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SBTVD-T	Sistema Brasileiro de Televisão Digital – Terrestre
SECAM	<i>Séquentielle Couleur Avec Mémoire</i>
SET	Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
TDS-OFDM	<i>Time Domain Synchronous – Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TV	Televisão
UHD	<i>Ultra-High Definition</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Objetivo Geral	6
1.2 Objetivos Específicos	7
2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO	8
2.1 Ondas Eletromagnéticas	9
2.1.1 <i>Ondas de Rádio</i>	12
2.1.2 <i>Intensidade de campo elétrico</i>	14
2.1.3 <i>Potência do sinal recebido</i>	15
2.2 Mecanismos de Propagação	16
2.2.1 <i>Refração</i>	16
2.2.2 <i>Reflexão</i>	18
2.2.3 <i>Difração</i>	21
2.2.4 <i>Dispersão</i>	23
2.3 Modelos de Propagação	24
2.3.1 <i>Modelo de Propagação no Espaço Livre</i>	25
2.3.2 <i>Modelos Determinísticos</i>	26
2.3.2.1 <i>Modelo de Traçado dos Raios (Ray-Tracing)</i>	26
2.3.2.2 <i>Modelo de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)</i>	28
2.3.2.3 <i>Modelo Utilizando Equações Parabólicas (PE)</i>	28
2.3.3 <i>Modelos Empíricos</i>	29
2.3.3.1 <i>Modelo Okumura</i>	29
2.3.3.2 <i>Modelo Hata</i>	32
2.3.3.3 <i>Modelo COST-231</i>	33
2.3.3.4 <i>Recomendação ITU-R P. 1546-6</i>	34
3 TELEVISÃO DIGITAL TERRESTRE	41
3.1 Histórico da Televisão	43
3.1.1 <i>A televisão no Brasil</i>	46
3.1.2 <i>Era digital</i>	47

3.2 Sistema de Televisão Digital Terrestre	50
3.3 Padrões de Televisão Digital.....	53
3.3.1 <i>Advanced Television Systems Committee (ATSC)</i>	54
3.3.2 <i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)</i>	55
3.3.3 <i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial (ISDB-T)</i>	56
3.3.4 <i>Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting (DTMB)</i>	56
3.4 Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T)	57
3.5 Legislação e Normas Técnicas de Radiodifusão	58
4 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	61
4.1 Métodos Determinísticos	62
4.1.1 <i>Inverso Ponderado da Distância</i>	62
4.1.2 <i>Método de Shepard Modificado</i>	63
4.1.3 <i>Curvatura Mínima</i>	64
4.1.4 <i>Função de Base Radial</i>	64
4.2 Métodos Geoestatísticos	65
4.2.1 <i>Variograma</i>	66
4.2.2 <i>Krigagem</i>	68
4.3 Validação Cruzada	69
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
5.1 Descrição da Estação de TV	72
5.2 Equipamentos de medição	74
5.3 Definição dos pontos de Medição	75
5.4 Campanha de medição	77
5.5 Tratamento dos Dados	78
6 RESULTADOS	80
6.1 Limiar de Recepção	80
6.2 Modelos de Propagação	81
6.2.1 <i>Modelo de Propagação do Espaço Livre</i>	81
6.2.2 <i>Modelo de Hata</i>	83

6.2.3	<i>Recomendação ITU-R P. 1546-6</i>	84
6.2.4	<i>Avaliação dos Modelos de Propagação</i>	85
6.3	Métodos de Interpolação	86
6.3.1	<i>Inverso Ponderado da Distância</i>	87
6.3.2	<i>Método de Shepard Modificado</i>	88
6.3.3	<i>Curvatura Mínima</i>	89
6.3.4	<i>Função de Base Radial</i>	90
6.3.5	<i>Krigagem Ordinária</i>	92
6.3.6	<i>Avaliação dos Métodos de Interpolação</i>	94
7	CONCLUSÃO	96
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A transição do sinal analógico para sinal digital no sistema de televisão aberta está em andamento no Brasil. Este processo teve início em 2016, quando o sinal analógico de televisão foi completamente desligado na cidade de Rio Verde, no estado de Goiás (GO). O desligamento total do sinal analógico de televisão aberta no Brasil está previsto para 31 de dezembro de 2023 (MCTIC, 2016).

O sistema digital de transmissão apresenta muitas vantagens em comparação com o sistema analógico, dentre elas, a facilidade em eliminar os efeitos degradantes do ruído do canal e distorção do sinal por meio de técnicas de correção de erro o que torna a qualidade da informação recebida superior. Além disso, o sistema digital é mais eficiente em termos de largura de banda e relação sinal-ruído (HAYKIN; MOHER, 2007).

Em 2018, a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua) realizou uma investigação com 71,7 milhões de domicílios particulares permanentes do país. Foi constatado que em 96,4% dos domicílios havia televisão. Dos domicílios com televisão 86,6% já tinham o conversor para receber o sinal digital de TV aberta, destes 74,7% já o estavam recebendo (IBGE, 2018).

Na cidade de Mossoró, localizada no estado do Rio Grande do Norte (RN), o sinal analógico foi completamente desligado no dia 9 de janeiro de 2019 (SEJA DIGITAL, 2019). Considerando a importância do sistema televisivo na divulgação de informações, ensino à distância, valorização da cultura e entretenimento, torna-se importante estudos de avaliação da propagação do sinal digital que possibilitem os radiodifusores desenvolver e aperfeiçoar o serviço de transmissão.

A medição em campo é uma das formas mais confiáveis para avaliar a propagação do sinal digital. Dados reais acerca da propagação do sinal digital servem de base para a identificação de técnicas que podem prever o comportamento do sinal em um determinado ambiente. Além disso, conhecer como o sinal digital está distribuído em uma região torna possível mapear áreas com menor intensidade do sinal, servindo de orientação para ajustes no sistema de transmissão.

No caminho percorrido do transmissor ao receptor, o sinal sofre degradação devida, entre outros fatores, à presença de obstáculos como prédios e vegetação. Os modelos de propagação buscam prever a perda do sinal durante a propagação, assim é possível estimar a potência recebida. Ao comparar as estimativas de diferentes modelos de propagação com os

dados obtidos nas medições, é possível identificar o modelo que mais se adequa a realidade do ambiente em estudo.

É pouco provável que a medição em campo cubra toda a área de cobertura da estação de TV ou uma determinada região de interesse. Para a obtenção de conclusões mais confiáveis, dados contínuos sobre toda a região podem ser obtidos a partir de métodos de interpolação espacial, que permitem estimar os valores da variável estudada nos locais onde não houve medição.

Nesta dissertação, foram realizadas medições da potência recebida do sinal digital de uma emissora de TV na cidade de Mossoró – RN. O foco das medições foi na região urbana da cidade, pois esta apresenta condições de propagação mais severas com uma quantidade maior de obstáculos e aglomerações. O nível de potência do sinal recebido foi analisado segundo a norma ABNT NBR 15604:2020 (Televisão digital terrestre – Receptores), que estabelece o limiar de recepção.

Os dados medidos foram comparados com as estimativas de potência recebida de diferentes modelos de propagação, a fim de identificar o modelo que fornece as melhores previsões. E os métodos de interpolação foram usados para obter os dados contínuos sobre toda a região e comparados para avaliar qual o mais adequado para representação da distribuição do sinal digital de TV na cidade Mossoró – RN.

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Após este capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta conceitos importantes para compreensão da propagação de ondas de rádio e alguns dos modelos de propagação mais utilizados em sistemas de telecomunicações. O Capítulo 3 faz uma abordagem geral do sistema de televisão digital terrestre. No Capítulo 4 são apresentados os métodos de interpolação espacial que serão utilizados no tratamento dos dados. Os materiais e métodos utilizados na realização deste trabalho são descritos no Capítulo 5. O Capítulo 6 mostra os resultados das análises dos dados coletados em campo e, finalmente, a conclusão é apresentada no Capítulo 7.

1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem o objetivo geral de analisar dados reais do nível de potência do sinal recebido de um sistema de televisão digital terrestre na região urbana da cidade de Mossoró – RN.

1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

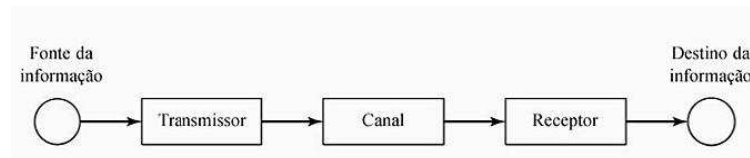
- Estudar acerca da propagação de ondas de rádio e principais modelos de propagação;
- Fazer levantamento do estado da arte sobre o sistema de televisão;
- Descrever os principais métodos de interpolação espacial e métricas de avaliação desses métodos;
- Realizar campanha de medição da potência recebida do sinal digital de TV na região urbana de Mossoró – RN;
- Verificar se os níveis de potência obtido nas medições atende ao limiar de recepção estabelecido em norma;
- Estimar a potência recebida do sinal digital de TV utilizando diferentes modelos de propagação e comparar com os valores medidos;
- Gerar mapas de distribuição espacial do sinal digital utilizando diferentes métodos de interpolação;
- Identificar o método de interpolação espacial mais adequado para representar a distribuição do sinal digital de TV na região urbana de Mossoró - RN.

2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO

De acordo com os Regulamentos de Rádio da *International Telecommunication Union* (ITU), as ondas de rádio, ou ondas hertzianas, são definidas como ondas eletromagnéticas de frequência arbitrariamente inferiores a 3.000 GHz, propagadas no espaço sem guia artificial (BARCLAY, 2013). A existência de ondas de rádio foi teoricamente prevista por James Clerk Maxwell em meados do século XIX. O conjunto de equações que regem a propagação de ondas eletromagnéticas é conhecido como equações de Maxwell em sua homenagem. A comprovação experimental da onda eletromagnética foi demonstrada anos depois pelo físico alemão Heinrich Hertz. Desde então, tem-se utilizado a propagação de ondas eletromagnéticas por longas distâncias como forma de transmitir informação (PAGANI et al., 2008).

Um sistema de transmissão de rádio, chamado de radiodifusão, possui três componentes básicos: o transmissor, o canal e o receptor, como mostrado na Figura 1. O transmissor recebe a informação da fonte e a modifica de forma que seja possível transmitir por meio do canal. O canal de propagação é o meio físico por onde a onda eletromagnética se propaga a fim de entregar a informação ao receptor. E o receptor tem a função de decodificar o sinal e obter uma estimativa da informação original, tendo em vista que esta pode ter sofrido diversas perdas durante o percurso no canal de propagação (HAYKIN; MOHER 2008).

Figura 1 – Sistema básico de comunicação



Fonte: HAYKIN e MOHER (2008)

A propagação no espaço livre, onde o percurso entre as antenas transmissora e receptora está livre de obstáculos, pode ser descrita de forma simples. O desafio maior ocorre quando o caminho do sinal entre o transmissor e o receptor possui obstrução, por exemplo, por prédios, florestas ou montanhas, além dos efeitos atmosféricos, como a presença de chuva. Dessa forma, a transmissão do sinal nem sempre terá um caminho direto, conhecido como caminho da linha de visão (*Line of Sight* – LOS). Pode haver vários caminhos percorridos, que resultam da interação entre a onda e os objetos ao redor, conhecido como caminho sem linha de visão (*None Line of Sight* – NLOS). Esse é o conceito de propagação

multipercurso, que acontece devido aos inúmeros fenômenos de propagação (PAGANI et al., 2008).

Segundo Saunders e Aragón-Zavala (2007), o canal de propagação pode apresentar três tipos de desvanecimento: perda do caminho, sombreamento ou desvanecimento multipercurso. A perda do caminho leva a diminuição geral na força do sinal à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta. Isso ocorre, principalmente, devido aos obstáculos no canal de propagação e pode acarretar variações de cerca de 150 dB sobre a área de cobertura projetada. O sombreamento surge devido à natureza variável das obstruções entre transmissor e receptor, como edifícios altos ou bosques densos e pode gerar variações de até 20 dB. Por fim, o desvanecimento multipercurso gera variações em torno de 35 – 40 dB. De acordo com Barclay (2013), múltiplos caminhos podem ser produzidos por reflexão ou dispersão do solo ou objetos, falta de homogeneidade da refratividade atmosférica ou caminho de raios múltiplos através da ionosfera. Assim, a propagação de múltiplos caminhos produz diferentes versões do sinal transmitido que se combinam no receptor.

Visando facilitar a transmissão de rádio, um grande número de pesquisas tem sido conduzido para caracterizar os diferentes mecanismos e ambientes de propagação. Este capítulo irá tratar do conceito de ondas eletromagnéticas aplicado a sistemas de rádio, os mecanismos básicos e os modelos de propagação das ondas mais importantes para a compreensão e desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Ondas Eletromagnéticas

A teoria das ondas eletromagnéticas foi publicada pela primeira vez por James Clerk Maxwell em 1873. As leis do eletromagnetismo foram compiladas na forma de quatro equações. Elas são apresentadas na forma diferencial nas Equações 1 a 4, para condições com variação temporal (POZAR, 2012; SADIKU, 2012).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Onde \vec{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico em C/m^2 , ρ_v é a densidade volumétrica de carga elétrica em C/m^3 , \vec{B} é o vetor densidade de fluxo magnético em T, \vec{E} é o vetor intensidade de campo elétrico em V/m, \vec{H} é o vetor intensidade de campo magnético em A/m e \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica em A/m^2 .

As duas primeiras equações de Maxwell, Equações 1 e 2, são referentes a lei de Gauss para campos eletrostáticos e magnetostáticos, respectivamente. A lei de Gauss para campos eletrostáticos estabelece que o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada é proporcional a carga total dentro dessa superfície. E a lei de Gauss para campos magnetostáticos, ou lei da conservação do fluxo magnético, define que o fluxo magnético total através de uma superfície fechada é sempre igual à zero. Diferentemente das linhas de fluxo elétrico, as linhas de fluxo magnético sempre se fecham sobre si mesmas. Isso se deve ao fato de que não é possível ter um polo magnético isolado ou “cargas magnéticas” (SADIKU, 2012).

A Equação 3 é conhecida como lei de Faraday e mostra que um campo magnético variante no tempo produz uma força eletromotriz (*fem*) que pode estabelecer uma corrente em um circuito fechado adequado. Onde a *fem* é uma tensão que surge devido ao movimento de condutores em um campo magnético ou a partir de campos magnéticos variantes (HAYT Jr; BUCK, 2003). A Equação 4 corresponde a equação de Maxwell baseada na lei circuital de Ampère para campos estáticos. A lei circuital de Ampère afirma que a integral de linha do campo magnético \vec{H} em um caminho fechado é exatamente igual à corrente contínua envolvida pelo caminho. O termo $\partial \vec{D} / \partial t$ representa a densidade de corrente de deslocamento e foi introduzido por Maxwell para situações com variação temporal. Sem esse termo a propagação de ondas eletromagnéticas não poderia ter sido prevista. Um campo é considerado eletromagnético quando as quatro equações de Maxwell são satisfeitas (SADIKU, 2012).

A existência das ondas eletromagnéticas, prevista pelas equações de Maxwell, foi comprovada experimentalmente por Heinrich Rudolf Hertz em 1887. E em sua homenagem, são chamadas de ondas hertzianas. A partir das equações de Maxwell é possível obter a equação vetorial de Helmholtz ou equação vetorial da onda, Equações 5 e 6, considerando a propagação no espaço livre (HAYT Jr; BUCK, 2003; POZAR, 2012).

$$\nabla^2 \vec{E}_s = -k_0^2 \vec{E}_s \quad (5)$$

$$\nabla^2 \vec{H}_s = -k_0^2 \vec{H}_s \quad (6)$$

Onde \vec{E}_s e \vec{H}_s são os campos na forma fasorial no domínio da frequência e k_0 é o número de onda no espaço livre definido como,

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \quad (7)$$

Onde ω é a frequência angular em rad/s, μ_0 é a permeabilidade do espaço livre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) e ε_0 é a permissividade do espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m). O termo $\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ tem aproximadamente o valor $1/c$, onde c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s). Portanto, $k_0 = \omega/c$. Para um período de onda $k_0 \lambda = 2\pi$, o comprimento de onda λ é dado por,

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_0} = \frac{c}{f} \quad (8)$$

onde f é a frequência em Hz. Uma proposta de solução da equação de Helmholtz, desenvolvida em Hayt e Buck (2003), possibilita a obtenção das formas reais instantâneas dos campos \vec{E} e \vec{H} ,

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(\omega t - k_0 z) \quad (9)$$

$$H_y(z, t) = E_{x0} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cos(\omega t - k_0 z) \quad (10)$$

A razão entre as intensidades dos campos elétrico e magnético é dada por,

$$\eta_0 = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (11)$$

onde η_0 é a impedância do espaço livre ($\eta_0 = 120\pi = 377 \Omega$) (HAYT Jr; BUCK, 2003).

Em 1884, o físico inglês John H. Poynting postulou o teorema de Poynting, Equação 12, que calcula a potência em uma onda plana uniforme (HAYT Jr; BUCK, 2003; SADIKU, 2012).

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[\frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right] dv - \int_V \sigma E^2 dv \quad (12)$$

Os termos dessa equação utilizam o conceito de conservação de energia para campos eletromagnéticos. O primeiro termo do lado direito da igualdade representa a taxa de decréscimo da energia armazenada nos campos elétrico e magnético e o segundo termo é a potência dissipada no caso do meio ser condutor. O termo $\vec{E} \times \vec{H}$ do lado esquerdo da igualdade é conhecido como o vetor de Poynting \vec{P} dado em W/m², Equação 13.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (13)$$

O vetor de Poynting representa a densidade de potência instantânea e sua integração sobre uma superfície fechada fornece a potência total que atravessa essa superfície (SADIKU, 2012).

2.1.1 Ondas de Rádio

Em 1895, Guglielmo Marconi demonstrou um sistema de rádio como uma tecnologia de comunicação eficaz. Isso só foi possível devido ao entendimento da propagação de ondas eletromagnéticas para a transmissão de informações. As ondas eletromagnéticas aplicadas a sistemas de comunicações de rádio, as chamadas ondas de rádio, correspondem a faixa de frequência de 3 kHz a 300 GHz, Tabela 1 (COLEMAN, 2004; SIZUN, 2005).

Tabela 1 – Faixas de radiofrequências (continua)

SIGLA	DESCRIÇÃO	FAIXA DE FREQUÊNCIA
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>	< 3 kHz
VLF	<i>Very Low Frequency</i>	3 – 30 kHz
LF	<i>Low Frequency</i>	30 – 300 kHz
MF	<i>Medium Frequency</i>	300 – 3.000 kHz
HF	<i>High Frequency</i>	3 – 30 MHz

Tabela 1 – Faixas de radiofrequências (conclusão)

SIGLA	DESCRIÇÃO	FAIXA DE FREQUÊNCIA
VHF	<i>Very High Frequency</i>	30 – 300 MHz
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	300 – 3.000 MHz
SHF	<i>Super High Frequency</i>	3 – 30 GHz
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>	30 – 300 GHz

Fonte: COLEMAN (2004) e SIZUN (2005)

A forma como os transmissores de radiodifusão fornecem cobertura para uma determinada área é chamada de transmissão ponto-a-área. A transmissão ocorre de uma antena central para várias outras antenas distribuídas na área de cobertura (HASLETT, 2008). Considerando que a área de um radiador isotrópico, antena ideal que irradia igualmente em todas as direções no espaço livre, tem a forma de uma esfera, em termos de rádio a densidade de potência à distância P_d da fonte é dada por

$$P_d = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (14)$$

onde P_t é a potência transmitida e r é o raio da área de cobertura da antena (WINDER; CARR, 2002). Na prática as antenas possuem diretividade, o que leva ao conceito de ganho da antena. O ganho da antena refere-se ao fato de que a diretividade da antena concentra a potência em determinadas direções. Dessa forma, a densidade de potência é dada por,

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \quad (15)$$

onde G_t é o ganho da antena transmissora (HASLETT, 2008). O produto $P_t G_t$ é chamado de potência isotrópica irradiada efetiva (*Effective Isotropic Radiated Power* – EIRP). Ele representa a potência irradiada máxima disponível de um transmissor na direção do ganho máximo da antena em relação ao radiador isotrópico. Na prática, é utilizada a potência irradiada efetiva (*Effective Radiated Power* – ERP) para indicar a potência máxima em relação à antena bipolar de meia onda (PROAKIS; SALEHI, 2002; RAPPAPORT, 2009). A ERP é uma das características principais de uma estação transmissora, pois afeta diretamente a intensidade de sinal na área de cobertura da estação (CARDOSO, 2018).

2.1.2 Intensidade de campo elétrico

Como já foi mostrado, a informação de um sinal de rádio viaja por meio de uma onda eletromagnética, onde existe um campo elétrico e um campo magnético associado. A densidade de potência da onda é fornecida pela Equação 13, que indica também a direção de propagação da onda. No entanto, apenas a magnitude da densidade de potência será analisada.

É comum analisar a recepção de um sistema de radiodifusão em termos da intensidade de campo elétrico. Considerando que a razão entre os campos elétrico e magnético é uma constante, Equação 11, a densidade de potência pode ser determinada a partir da Equação 16 (HASLETT, 2008).

$$P_d = EH = \frac{E^2}{\eta_0} = \frac{E^2}{120\pi} \quad (16)$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 16, tem-se

$$E = \frac{\sqrt{30P_tG_t}}{r} \quad (17)$$

onde E é medido em V/m e r é medido em metros. Como as intensidades de campo elétrico recebidas são muito pequenas, o $\mu\text{V/m}$ tornou-se uma medida padrão. Da mesma forma, as distâncias são medidas em km. Portanto,

$$E(\mu\text{V} / \text{m}) = 1.000.000 \frac{\sqrt{30P_tG_t}}{1.000r} = 5.480 \frac{\sqrt{P_tG_t}}{d} \quad (18)$$

É comum tomar um valor de P_tG_t como 1 kW transmitidos através de um dipolo de meia onda (um dipolo de meia onda tem um ganho de 2,14 dBi, que é como uma proporção de 1,64). Assim, um valor padrão de P_tG_t é 1.640. Dessa forma,

$$E(\mu\text{V} / \text{m}) = 5.480 \frac{\sqrt{1.640}}{d} = \frac{222.000}{d} \quad (19)$$

O valor de E é geralmente expresso em unidades logarítmicas (dB em relação a $1 \mu\text{V/m}$, ou $\text{dB}\mu\text{V/m}$):

$$E(\text{dB}\mu\text{V} / \text{m}) = 20 \log \left(\frac{222.000}{d} \right) = 106,9 - 20 \log d \quad (20)$$

Portanto, ao analisar a recepção de um sistema de radiodifusão, a intensidade de campo elétrico em $\text{dB}\mu\text{V/m}$ pode ser calculada através da Equação 20.

2.1.3 Potência do sinal recebido

De acordo com Haslett (2008), em um sistema de radiodifusão, a potência recebida P_r em W pode ser obtida multiplicando a densidade de potência pela abertura efetiva da antena receptora. Considerando uma antena isotrópica, sua abertura efetiva é dada por $A_{ei} = \lambda^2 / 4\pi$ e $\lambda = c / f$, com f em MHz, então

$$P_r(\text{isotrópica}) = \frac{E^2}{120\pi} \frac{7160}{f(\text{MHz})^2} \quad (21)$$

Se E for expresso em $\mu\text{V/m}$ e P_r for medido em mW,

$$P_r(\text{mW}) = \frac{E(\mu\text{V} / \text{m})^2}{10^9 \times 120\pi} \frac{7160}{f(\text{MHz})^2} = 1,9 \times 10^{-8} \frac{E(\mu\text{V} / \text{m})^2}{f(\text{MHz})^2} \quad (22)$$

Convertendo para unidades logarítmicas,

$$P_r(\text{dBm}) = -77,2 + 20 \log E(\mu\text{V} / \text{m}) - 20 \log f(\text{MHz}) \quad (23)$$

$$P_r(\text{dBm}) = E(\text{dB}\mu\text{V} / \text{m}) - 20 \log f(\text{MHz}) - 77,2 \quad (24)$$

Essa é a potência que seria recebida por uma antena isotrópica. Para obter a potência recebida por uma antena direcional é preciso adicionar o ganho (em dBi) a este valor (HASLETT, 2008).

2.2 Mecanismos de Propagação

Considerando que comunicações terrestres ocorrem em meios obstruídos por terrenos irregulares, vegetação densa, construções e etc, geralmente não há linha de visão direta entre o transmissor e o receptor. Dessa forma, diversos mecanismos influenciam na propagação de ondas eletromagnéticas, nesta seção serão abordados: refração, reflexão, difração e dispersão.

A refração é causada por variações do índice de refração nos diferentes níveis da atmosfera. O índice de refração diminui com a altura devido a menor pressão atmosférica e sofre variações com os efeitos do clima. Esse mecanismo faz com que as ondas de rádio curvem para baixo, permitindo a recepção dos sinais (GRAHAM; KIRKMAN; PAUL, 2007). A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética colide com um objeto de superfície lisa muito maior que seu comprimento de onda, como o solo e edifícios. Nesse caso, parte da energia é transmitida ao objeto e outra parte é refletida de volta ao meio, havendo mudança na fase do sinal original que foi transmitido.

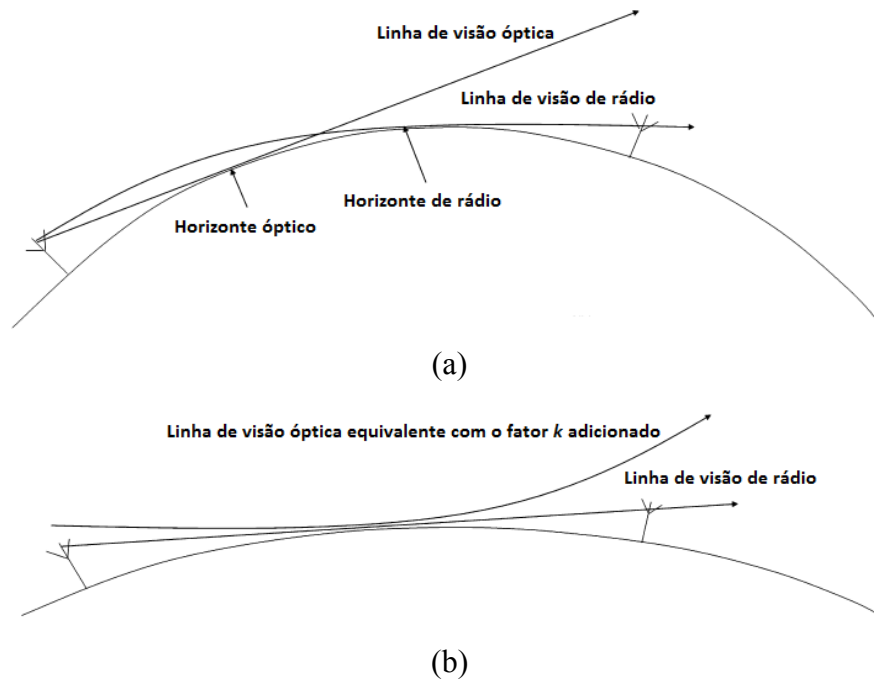
A difração surge a partir de irregularidades afiadas no terreno entre o transmissor e o receptor. Quando a onda encontra o obstáculo surgem ondas secundárias que se combinam para produzir uma nova frente de onda na direção da propagação. E a dispersão ocorre quando o canal de propagação é obstruído por objetos de dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda de superfície rugosa ou irregular, como folhagens, sinais de trânsito e postes de iluminação. Esse fenômeno faz com que a energia da onda seja espalhada em todas as direções ao colidir com os obstáculos (RAPPAPORT, 2009).

2.2.1 Refração

Segundo Graham, Kirkman e Paul (2007), o efeito da variação do índice de refração nos diferentes níveis da atmosfera permite que as ondas de rádio se propaguem ao longo do horizonte aparente, o que significa dizer que o horizonte das ondas de rádio está além do horizonte óptico, como mostra a Figura 2(a). Através de uma correção no raio real da Terra de 6.370 km, tornando o raio aparente maior de forma que coincida com o caminho refratado mediano das ondas de rádio, é possível alterar a geometria fazendo com que as ondas de rádio curvadas pareçam retas, conforme é ilustrado na Figura 2(b). O raio corrigido é conhecido como raio efetivo da Terra e representa $4/3$ do tamanho real para o noroeste da Europa. O

multiplicador de 4/3, chamado fator k , varia continuamente de acordo com as condições atmosféricas.

Figura 2 – Refração de ondas de rádio utilizando (a) o raio real da Terra e (b) o fator k para aumentar o raio real da Terra



Fonte: Adaptado de GRAHAM; KIRKMAN; PAUL (2007)

A ITU-R P. 453 apresenta mapas de índice de refração mediano que podem ser utilizados no planejamento de sistemas de rádio em locais específicos do mundo e em diferentes épocas do ano. O índice de refração de rádio N pode ser calculado a partir de medições através da Equação 25 e a dependência da altura de longo prazo no índice de refração N_s por meio da Equação 26.

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,732 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (25)$$

$$N_s = N_0 \exp\left(\frac{-h_s}{h_0}\right) \quad (26)$$

Onde P é a pressão atmosférica em hPa, e é a pressão de vapor de água em hPa, T é a temperatura absoluta em K, $N_0 = 315$, $h_0 = 7,35$ km e h_s é a altura em km. Para determinar o

raio efetivo da Terra em circunstâncias específicas ao modelar a propagação de rádio, o fator k pode ser calculado por

$$k = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (27)$$

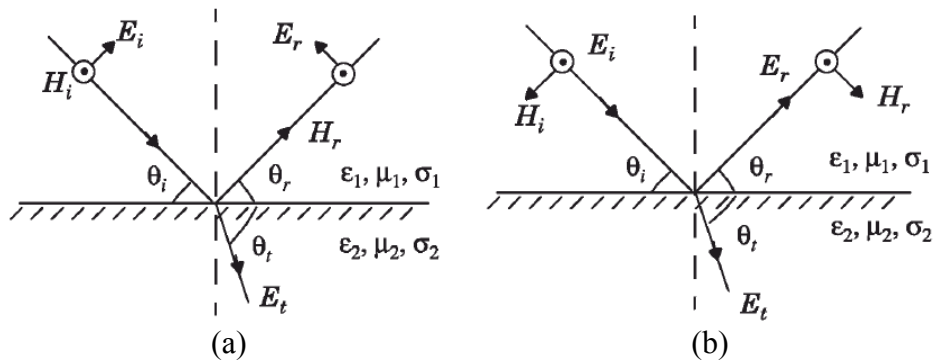
Na Equação 27, ΔN é o gradiente do índice de refração fornecido pela ITU-R P. 453 para o primeiro 1 km da atmosfera (GRAHAM; KIRKMAN; PAUL, 2007).

2.2.2 Reflexão

Quando uma onda de rádio que se propaga em um determinado meio incide em um dielétrico perfeito, parte da energia é transmitida para o dielétrico e outra parte é refletida para o meio. Ao incidir sobre um condutor perfeito, toda a energia é refletida para o meio sem que haja perda. A intensidade de campo elétrico das ondas refletida e transmitida se relaciona com a onda original incidente através do coeficiente de reflexão de Fresnel (Γ) (RAPPAPORT, 2009).

A Figura 3 ilustra a incidência de uma onda eletromagnética com um plano que demarca dois meios dielétricos diferentes. O campo elétrico é representado por E , o campo magnético por H e o ângulo entre a onda e o plano por θ . Os subscritos i , r e t referem-se aos campos incidente, refletido e transmitido, respectivamente. E os parâmetros ε , μ e σ representam a permissividade, permeabilidade e condutividade dos respectivos meios.

Figura 3 – Onda eletromagnética incidente com (a) polarização do campo E paralela ao plano de incidência e (b) polarização do campo E normal ao plano de incidência



Fonte: RAPPAPORT (2002)

O plano dos raios incidentes, transmitidos e refletidos é definido como plano de incidência. Na Figura 3(a), a polarização do campo elétrico E é paralela ao plano de incidência e perpendicular em relação à superfície refletora. Na Figura 3(b), a polarização do campo E é perpendicular ao plano de incidência (apontando da página para o leitor, ou seja, perpendicular à página) e paralela à superfície refletora.

De acordo com Rappaport (2009), os coeficientes de reflexão para os dois casos de polarização do campo E , paralelo e perpendicular ao plano de incidência, podem ser calculados através das Equações 28 e 29, respectivamente.

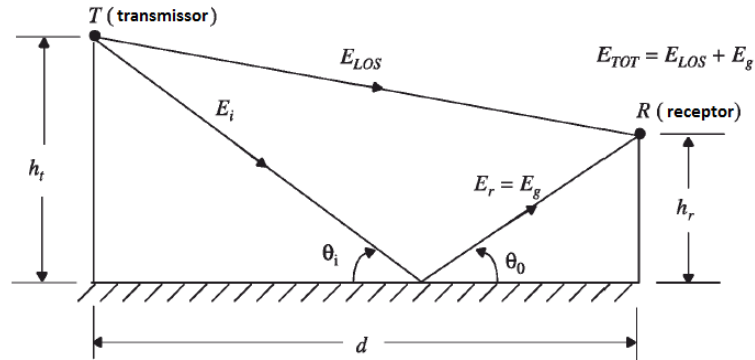
$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t} \quad (28)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t} \quad (29)$$

Onde η_i é a impedância intrínseca do i -ésimo meio e é dada por $\sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}$. Quando a onda eletromagnética incide sobre um condutor perfeito, a onda refletida deve ser igual em magnitude à onda incidente, pois o campo elétrico na superfície do condutor é igual a zero de acordo com as equações de Maxwell. Portanto, para o caso em que a polarização do campo E é paralela ao plano de incidência $\theta_i = \theta_r$ e $E_i = E_r$. E para o caso onde a polarização do campo E é normal ao plano de incidência $\theta_i = \theta_r$ e $E_i = -E_r$. Dessa forma, para um condutor perfeito as Equações 28 e 29 resultam em $\Gamma_{\parallel} = 1$ e $\Gamma_{\perp} = -1$. Ondas com polarização elíptica podem ser analisadas por meio de sobreposição.

Segundo Rappaport (2009), o modelo de reflexão no solo de dois raios, mostrado na Figura 4, é um modelo de propagação baseado na ótica geométrica que considera o caminho de propagação direto e um caminho refletido no solo entre o transmissor e o receptor. Esse modelo é considerado razoavelmente preciso quando o sistema de rádio possui distâncias de vários quilômetros e utilizam torres acima de 50 m de altura.

Figura 4 – Modelo de reflexão no solo de dois raios



Fonte: RAPPAPORT (2002)

Na Figura 4, h_t é a altura do transmissor e h_r é a altura do receptor. O campo recebido total E_{TOT} é o resultado do componente direto E_{LOS} e o componente refletido no solo E_g . A Equação 30 expressa o valor de campo E recebido no modelo de reflexão no solo de dois raios.

$$|E_{TOT}(d)| = 2 \frac{E_0 d_0}{d} \text{sen} \left(\frac{\theta_\Delta}{2} \right) \quad (30)$$

Onde d é a distância entre o transmissor e o receptor em m, E_0 é a intensidade de campo elétrico em espaço livre a uma distância de referência d_0 e θ_0 é a diferença de fase entre os componentes direto e refletido calculado de acordo com a Equação 31.

$$\theta_\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \quad (31)$$

Onde λ é o comprimento de onda em m. A diferença do caminho de linha de visão e o caminho refletido no solo, Δ , pode ser expressa como

$$\Delta = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (32)$$

A potência recebida P_r a uma distância d do transmissor e a perda no caminho PL para o modelo de reflexão no solo de dois raios são definidas pelas Equações 33 e 34, respectivamente.

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (33)$$

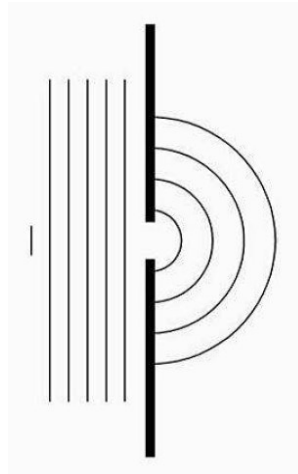
$$PL(dB) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (34)$$

Onde P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena transmissora e G_r é o ganho da antena receptora.

2.2.3 Difração

A difração pode ser explicada pelo princípio de Huygen, que afirma que todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais que geram ondas secundárias. Essas ondas secundárias se somam produzindo uma nova frente de onda que continua a se propagar (SAUNDERS; ARAGÓN-ZAVALA, 2007). O termo difração refere-se ao fenômeno de espalhamento das ondas eletromagnéticas ao atravessar pequenas fendas ou orifícios, conforme é mostrado na Figura 5 (HAYKIN; MOHER, 2008).

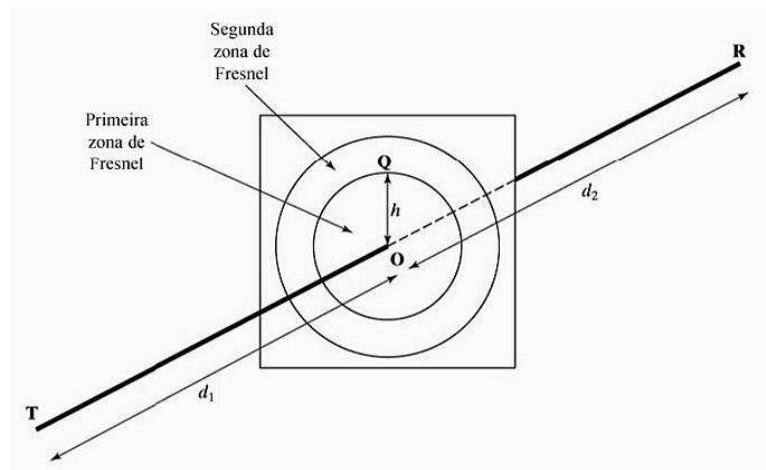
Figura 5 – Onda plana passando, da esquerda para a direita, através de uma fenda



Fonte: HAYKIN e MOHER (2008)

De acordo com Haykin e Moher (2008), a perda por difração em função da diferença de caminho em torno de uma obstrução pode ser explicada pelas zonas de Fresnel. A Figura 6 mostra um plano no ponto O perpendicular à distância d_1 do transmissor T e d_2 do receptor R e sobre esse plano, vários círculos concêntricos de raios arbitrários. Os círculos concêntricos nas origens das ondas secundárias são chamados de zonas de Fresnel.

Figura 6 – Zonas de Fresnel



Fonte: HAYKIN e MOHER (2008)

O caminho de propagação passando por qualquer um desses círculos é maior que o caminho direto da linha de visão. A diferença de fase entre o percurso direto e o percurso passando pelo ponto Q sobre o círculo de raio h é dada pelo parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff v . O parâmetro v é uma quantidade adimensional que caracteriza a diferença de fase entre dois percursos de propagação. Supondo que $h \ll d_1$, ele é dado por

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (35)$$

As zonas de Fresnel são regiões sucessivas da extensão do caminho de propagação das ondas secundárias, maior $q\lambda/2$ que a extensão do caminho de linha de visão. O círculo menor ($q = 1$) é conhecido como primeira zona de Fresnel. O volume entre o primeiro e o segundo círculo ($q = 2$) é conhecido como segunda zona de Fresnel e assim por diante. O raio r_q do q -ésimo círculo da zona de Fresnel é aproximado através da Equação 36, considerando $d_1, d_2 \gg r_q$. Para obter o modo de transmissão no espaço livre, a primeira zona de Fresnel deve estar livre de obstáculos (HAYKIN; MOHER, 2008).

$$r_q = \sqrt{\frac{q\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (36)$$

Para estimar a atenuação do sinal causada por difração, utiliza-se o modelo de propagação por gume de faca (*knife-edge*), quando o sombreamento é causado por um único

obstáculo, como uma montanha ou colina. A intensidade de campo elétrico no receptor é a resultante da soma vetorial dos campos emitidos por todas as fontes de Huygen secundárias que se encontram no plano do gume de faca, dada por

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^{\infty} \exp\left(-\frac{j\pi t^2}{2}\right) dt \quad (37)$$

onde E_d é a intensidade de campo elétrico de uma onda difratada em gume de faca, E_0 é o campo elétrico no espaço livre e $F(v)$ é a integral de Fresnel complexa em função do parâmetro de difração de Fresnel-Kirchoff v (RAPPAPORT, 2009).

2.2.4 Dispersão

A dispersão ocorre quando uma onda de rádio se choca com uma superfície áspera e a energia refletida é espalhada em todas as direções. Esse efeito oferece energia adicional aos receptores de rádio. Diferentemente de superfícies planas com dimensões muito maiores que um comprimento de onda que podem ser consideradas superfícies refletoras, a aspereza de uma superfície produz efeitos diferentes do mecanismo de reflexão. De acordo com o critério de Rayleigh, a altura crítica h_c de protuberâncias da superfície para um determinado ângulo de incidência é dada por

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \operatorname{sen} \theta_i} \quad (38)$$

Se a superfície possui diferença h entre a protuberância mínima e máxima menor que h_c pode ser considerada lisa, se a diferença for maior que h_c é considerada áspera. Para superfícies ásperas, o coeficiente de reflexão da superfície plana precisa ser multiplicado pelo fator de perda de dispersão ρ_s , Equação 39. Portanto, os campos E refletidos por superfícies ásperas podem ser solucionados utilizando um coeficiente de reflexão modificado, dado pela Equação 40.

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (39)$$

$$\Gamma_{\text{superfícies-ásperas}} = \rho_s \Gamma \quad (40)$$

Onde σ_h é o desvio padrão da altura da superfície sobre a altura média da superfície e I_0 é a função de Bessel do primeiro tipo e ordem zero (RAPPAPORT, 2009).

2.3 Modelos de Propagação

Os modelos de propagação tem o objetivo de fornecer uma boa estimativa da potência necessária para o estabelecimento de enlace de comunicações, visando minimizar os efeitos das perdas que ocorrem no caminho de propagação (HAYKIN; MOHER, 2008). Em geral, eles preveem que a potência recebida em um sistema de transmissão de rádio diminui em função da distância de separação entre o transmissor e o receptor elevada a alguma potência (RAPPAPORT, 2009). Portanto, os modelos de propagação constituem uma ferramenta essencial no planejamento de um sistema de radiodifusão. De acordo com Barclay (2013), as previsões do desempenho de circuitos de rádio devem ser baseadas em modelos de propriedades teóricas das ondas eletromagnéticas. Mas devido à complexidade que cada região apresenta em relação ao terreno, construções e clima, são necessárias observações empíricas para suplementar as expectativas teóricas.

O modelo de propagação no espaço livre é utilizado para prever a intensidade do sinal recebido quando o caminho entre as antenas transmissora e receptora possui linha de visão limpa (RAPPAPORT, 2009). Nos casos em que o ambiente é obstruído, os modelos de propagação costumam ser classificados como determinísticos ou empíricos. Segundo Haykin e Moher (2008), os modelos determinísticos consideram a geometria exata do meio de propagação. Esse tipo de modelo fornece estimativas mais confiáveis do comportamento da propagação, porém é mais complexo do ponto de vista computacional. Os modelos empíricos são baseados em medições das características de propagação em uma grande variedade de meios. Portanto, são modelos baseados em estatísticas medidas para uma classe específica de ambientes. Esses modelos são mais fáceis de descrever e de serem utilizados, no entanto, são menos precisos que os modelos determinísticos. Esta seção apresenta alguns dos modelos de propagação mais importantes para sistemas de radiodifusão.

2.3.1 Modelo de Propagação no Espaço Livre

De acordo com Rappaport (2009), em um ambiente livre de obstruções, a potência recebida P_r pode ser calculada através da equação do espaço livre de Friis,

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (41)$$

onde P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, d é a distância de separação entre o transmissor e o receptor em metros, L é o fator de perda e λ é o comprimento de onda em metros. Os valores de P_t e P_r devem ser representados nas mesmas unidades e os ganhos G_t e G_r são adimensionais. O fator de perda L está relacionado às perdas das antenas, linha de recepção e filtro com valores de $L \geq 1$, onde $L = 1$ indica que não há perdas referentes ao hardware do sistema. A partir da Equação 41, a potência recebida pelo modelo do Espaço Livre, em dBm, é dada por

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + G_t(\text{dBd}) + G_r(\text{dBd}) - L(\text{dB}) + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (42)$$

A perda do caminho L em dB, definida como a diferença entre a potência transmitida efetiva e a potência recebida, pode ser calculada através da Equação 43. Ao considerar que as antenas possuem ganhos unitários, a perda do caminho pode ser calculada através da Equação 44.

$$L = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (43)$$

$$L = -10 \log \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 = -20 \log \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right] \quad (44)$$

O modelo de propagação no espaço livre é válido quando o receptor se encontra na região de campo distante ou região de Fraunhofer da antena de transmissão. A distância d_f , que representa a região de campo distante, é expressa pela Equação 45. Essa distância ainda

deve satisfazer as condições: $d_f \gg D$ e $d_f \gg \lambda$. Onde D é a maior dimensão linear física da antena.

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (45)$$

Em sistemas de comunicação por satélite e enlaces de rádio de microondas com linha de visão considera-se que a propagação ocorre no espaço livre (RAPPAPORT, 2009). Apesar de que esse conceito é essencialmente teórico e usado como referência. Na prática, a propagação é afetada por diferentes mecanismos, em maior ou menor grau a depender do ambiente (PAGANI et al., 2008).

2.3.2 Modelos Determinísticos

Modelos determinísticos são baseados na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas. As características de propagação das ondas podem ser calculadas a partir das equações de Maxwell. Para isso, é necessária a utilização de operações matemáticas e cálculos numéricos complexos. Além disso, a utilização de modelos determinísticos requer profundo conhecimento da geometria do ambiente, para levar em consideração as interações da onda com os objetos ao redor. Isso permite fazer previsões precisas da propagação do sinal no canal correspondente ao ambiente considerado. A complexidade desses modelos faz com que sejam pouco utilizados no planejamento prático dos sistemas de comunicação (PAGANI et al., 2008; SAUNDERS; ARAGÓN-ZAVALA, 2007). Neste trabalho, serão abordados: o modelo de traçado dos raios (*Ray-Tracing*), modelo de diferenças finitas no domínio do tempo (*Finite-Difference Time-Domain* – FDTD) e o modelo utilizando equações parabólicas (*Parabolic Equation* – PE).

2.3.2.1 Modelo de Traçado dos Raios (*Ray-Tracing*)

O modelo de traçado dos raios (*Ray-Tracing*) busca prever o maior número possível de campos diretos, refletidos, difratados e transmitidos, com o objetivo de garantir a precisão das previsões de intensidade de campo (BARCLAY, 2013). Segundo Didascalou (2000), este modelo é baseado na Óptica Geométrica (*Geometric Optics* – GO), na Teoria Geométrica de

Difração (*Geometrical Theory of Diffraction* - GTD) e sua extensão, a Teoria Uniforme de Difração (*Uniform Theory of Diffraction* – UTD).

A GO é um método aproximado de alta frequência utilizado na determinação de propagação de ondas para campos incidentes, refletidos e refratados. Este método considera que a energia é irradiada por meio de tubos infinitesimalmente pequenos, chamados de raios. Esses raios definem a direção de propagação e viajam em linha reta desde que o índice de refração relativo do meio seja constante. A GTD e UTD introduzem os raios difratados e garantem a continuidade do campo em regiões em que a GO não consegue prever.

Duas técnicas se destacam na determinação dos raios: o método das imagens e o método de lançamento de raios. O método das imagens gera as imagens do transmissor em todos os planos do ambiente e essas imagens atuam como fontes secundárias para pontos de reflexão subsequentes. Isso permite modelar as reflexões e difrações simples e múltiplas, possibilitando calcular todas as atenuações associadas à propagação. Se a transmissão através das superfícies for significativa, os raios transmitidos também serão rastreados. Este método é eficiente para ambientes que não apresentam complexidade em sua estrutura.

O método de lançamento de raios consiste em lançar raios espaçadamente aplicando um incremento angular no transmissor. Ao interagir com os obstáculos são aplicados os conceitos dos mecanismos de reflexão e difração. O traçado de um raio é encerrado quando sua atenuação excede um limite predefinido (BARCLAY, 2013). Após a obtenção dos raios é possível calcular o campo propagado do transmissor ao receptor.

O modelo de traçado de raios é um dos modelos de previsão de intensidade de campo mais precisos. No entanto, necessitam de um conjunto de dados extremamente detalhado da área a ser analisada. A precisão do modelo está diretamente ligada à complexidade do banco de dados do *layout* do ambiente. E um conjunto de dados complexo exige capacidade computacional elevada (NESKOVIC, A.; NESKOVIC, N.; PAUNOVIC, 2000).

Além da complexidade do modelo de traçado dos raios, outras desvantagens devem ser levadas em consideração. Não é possível modelar processos ópticos não geométricos, como espalhamento difuso de superfícies ásperas e propagação através de meios desordenados, como vegetação, a falta de conhecimento da estrutura interna dos edifícios pode comprometer significativamente a previsão e este modelo não considera todos os mecanismos importantes em determinados ambientes (BARCLAY, 2013). A combinação do modelo de traçado de raios com um modelo de abordagem exata, como o modelo de

diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), pode ser vantajosa na previsão da propagação (PAGANI et al., 2008).

2.3.2.2 Modelo de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

Em ambientes onde as antenas de transmissão e recepção são inevitavelmente instaladas próximas às estruturas de propriedades complexas, o modelo de traçado dos raios falha em prever corretamente os campos espalhados. Nesses casos, a propagação pode ser modelada através da solução das equações de Maxwell (SARKAR et al., 2003). O modelo de diferenças finitas no domínio do tempo, do inglês *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD), é um dos métodos mais utilizados para obter a solução numérica das equações de Maxwell. Sua precisão é comparável ao modelo de traçado dos raios (NESKOVIC, A.; NESKOVIC, N.; PAUNOVIC, 2000).

O FDTD caracteriza a propagação de rádio a partir da solução das equações de Maxwell usando discretização espacial regular no tempo. Para garantir a estabilidade do cálculo, o método restringe o tamanho das células consideradas e a grade de tempo. O ambiente também é limitado por paredes absorventes, visando controlar os fenômenos de reflexão nas fronteiras. Utilizar esse modelo exige uma alta capacidade de memória, tendo em vista que são obtidas soluções para todos os pontos do ambiente nos diferentes instantes de tempo (PAGANI et al., 2008). Devido à complexidade computacional, este método é mais usado para modelar a propagação em ambientes pequenos em relação ao comprimento de onda, ou para complementar outras abordagens (PAGANI et al., 2008).

2.3.2.3 Modelo Utilizando Equações Parabólicas (PE)

O método de equações parabólicas, do inglês *Parabolic Equation* (PE), foi aplicado pela primeira vez à modelagem de propagação acústica subaquática por Leontovich e Fock na década de 1940 (APAYDIN; SEVGI, 2017). A partir da década de 1990, os computadores digitais propiciaram a utilização do método de equações parabólicas para modelar a propagação de ondas de rádio em frequências UHF. Esse modelo busca resolver numericamente a equação de onda de forma direta, fazendo uso de suposições e simplificações (BARCLAY, 2013). Ele leva em consideração a curvatura da Terra, as

variações de refração atmosférica e o espalhamento devido às irregularidades no terreno (APAYDIN; SEVGI, 2017).

Dois abordagens são, geralmente, utilizadas em conjunto com o PE: o método de etapa dividida usando transformada de Fourier e o método de elementos finitos. O método PE torna possível prevê a intensidade de campo onde o modelo de traçado dos raios falha (SAUNDERS; ARAGÓN-ZAVALA, 2007). Em Magno (2006), a perda do caminho em ambiente interno é calculada a partir da formulação de equações parabólicas e em Oliveira (2013) o método PE é aplicado em ambiente externo.

2.3.3 Modelos Empíricos

Os modelos empíricos são obtidos a partir de um extenso conjunto de medições. Com os dados obtidos em campo, é formulada uma função com parâmetros que caracterizam o ambiente. Esses modelos têm sido amplamente empregados no planejamento de sistemas de comunicação devido à sua facilidade em relação aos modelos determinísticos. Apesar do bom desempenho que esses modelos apresentam, algumas limitações devem ser consideradas: os modelos empíricos atendem apenas aos intervalos de parâmetros que foram utilizados no conjunto de medições original, não fornecem visão física dos mecanismos de propagação no meio e não consideram possíveis obstáculos que podem modificar significativamente a propagação.

Ao utilizar um determinado modelo, pressupõe-se que as características do ambiente a ser previsto são suficientemente semelhantes ao ambiente onde as medições originais foram realizadas, possibilitando prever a propagação do sinal com precisão aceitável. Portanto, para obter bons resultados, é de extrema importância classificar corretamente o ambiente considerado (SAUNDERS; ARAGÓN-ZAVALA, 2007). Serão descritos alguns dos modelos empíricos para ambientes externos que mais se destacam: modelo Okumura, modelo Hata, modelo COST 231 e a Recomendação ITU-R P. 1546-6.

2.3.3.1 Modelo Okumura

O modelo de Okumura é totalmente baseado em dados medidos e não oferece qualquer explicação analítica. É considerado um dos modelos mais simples e mais precisos na previsão de perda do caminho em sistemas de rádio. As previsões de perda do caminho são

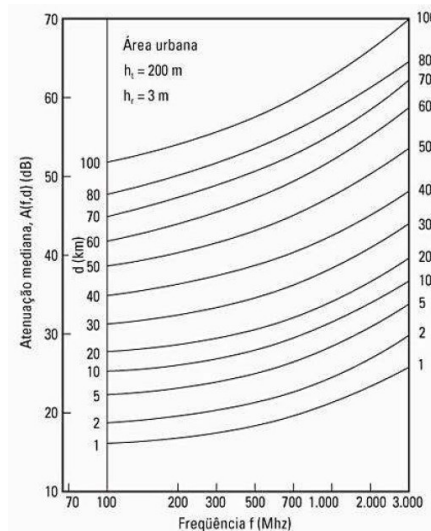
feitas por meio dos gráficos desenvolvidos por Okumura e incluem fatores de correção aplicados a alguns parâmetros. Esse modelo se aplica a sistemas de comunicação na faixa de frequência de 150 MHz a 1.920 MHz, distância entre transmissor e receptor de 1 km a 100 km e altura efetiva da antena de transmissão variando de 30 m a 100 m (RAPPAPORT, 2009).

A área de previsão é dividida em: área urbana, área suburbana e área aberta. A área urbana representa uma cidade construída com casas de um ou mais andares, grandes edifícios e árvores altas e densas. A área suburbana representa uma vila ou bairro com alguns obstáculos, mas não muito congestionado. E a área aberta representa zonas rurais, sem árvores altas ou edifícios e áreas desmatadas 300 - 400 m à frente (SEYBOLD, 2005). Segundo Rappaport (2009), a perda do caminho pelo modelo de Okumura pode ser calculada através da Equação 46.

$$L_{50}(dB) = L_f + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{\acute{A}REA} \quad (46)$$

Onde L_{50} é o valor médio da perda do caminho de propagação e L_f é a perda de propagação no espaço livre. A variável A_{mu} é a atenuação média relativa ao espaço livre, em uma área urbana com terreno quase plano, altura efetiva da antena de transmissão (h_{te}) de 200 m e altura efetiva da antena de recepção (h_{re}) de 3 m. Os termos $G(h_{te})$, $G(h_{re})$ e $G_{\acute{A}REA}$ são os fatores de ganho da altura da antena de transmissão, da altura da antena de recepção e do tipo de ambiente, respectivamente. A Figura 7 mostra o gráfico de A_{mu} em função da frequência e da distância.

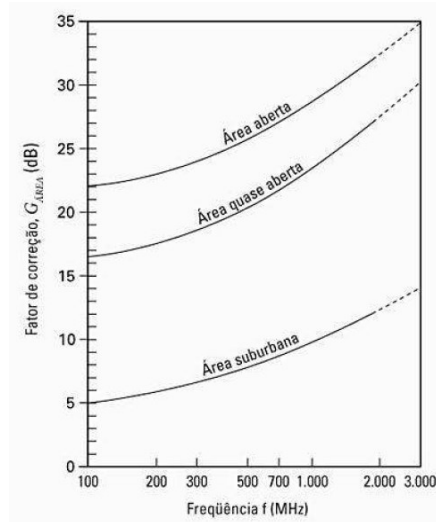
Figura 7 – Atenuação mediana relativa ao espaço livre para um terreno quase plano



Fonte: RAPPAPORT (2009)

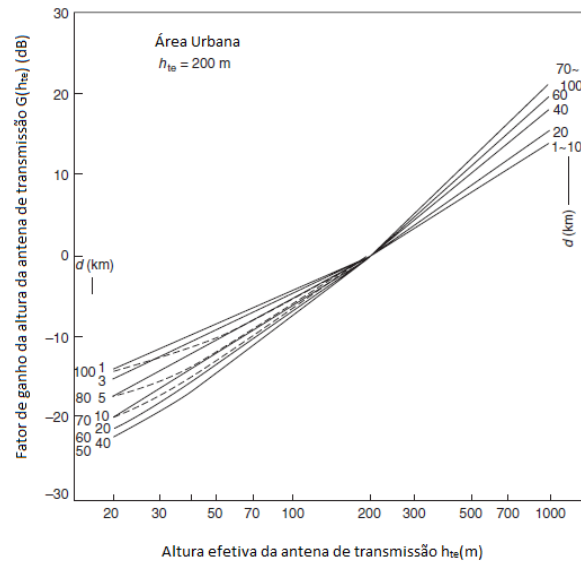
O fator de correção para diferentes tipos de ambientes é apresentado na Figura 8. E os fatores de ganho da altura da antena de transmissão e de recepção para áreas urbanas são mostrados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 8 – Fator de correção para diferentes tipos de terreno



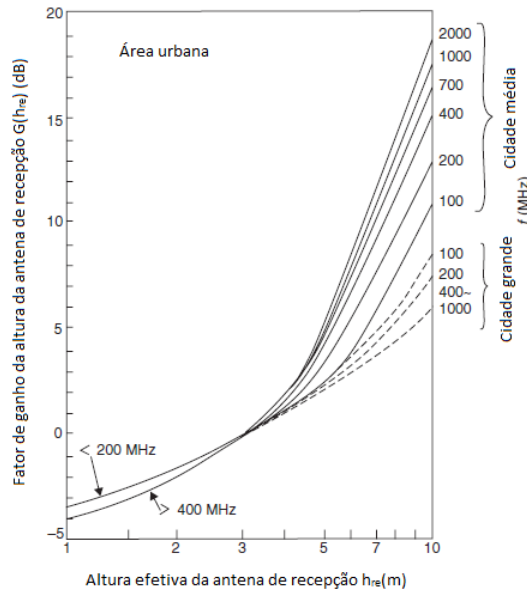
Fonte: RAPPAPORT (2009)

Figura 9 – Fator de correção da altura da antena de transmissão



Fonte: Adaptado de SEYBOLD (2005)

Figura 10 – Fator de correção da altura da antenna de recepção



Fonte: Adaptado de SEYBOLD (2005)

O modelo de Okumura tem um melhor desempenho em áreas urbanas e suburbanas. Apresentando desvio padrão entre os valores previsto e medido de perda do caminho cerca de 10 dB a 14 dB.

2.3.3.2 Modelo Hata

O modelo de Hata (1980), também conhecido como Okumura-Hata, é um modelo empírico baseado no modelo de Okumura. Este modelo se aplica a sistemas de comunicação na faixa de frequência de 150 MHz a 1.500 MHz, distância entre transmissor e receptor de 1 km a 20 km, altura efetiva da antena de transmissão variando de 30 m a 200 m e altura efetiva da antena de recepção variando de 1 m a 10 m. Há três fórmulas diferentes para calcular a perda média no caminho pelo modelo de Hata: para áreas urbanas, áreas suburbanas e áreas abertas. Em áreas urbanas, a perda do caminho L_{50} pode ser calculada através da Equação 47.

$$L_{50}(dB) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d \quad (47)$$

Onde f_c é a frequência em MHz, h_{te} é a altura efetiva da antena transmissora em metros, h_{re} é a altura efetiva da antena receptora em metros, d é a distância de separação entre as antenas de transmissão e recepção em km e $a(h_{re})$ é o fator de correção da altura da antena de recepção

em dB. O fator de correção para cidades pequenas e médias pode ser calculado através da seguinte expressão,

$$a(h_{re}) = (1,1 \log f_c - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f_c - 0,8) \quad (48)$$

E para cidades grandes utilizam-se as Equações 49 e 50.

$$a(h_{re}) = 8,29(\log 1,54h_{re})^2 - 1,10 \text{ para } f_c \leq 300\text{MHz} \quad (49)$$

$$a(h_{re}) = 3,20(\log 11,75h_{re})^2 - 4,97 \text{ para } f_c \geq 300\text{MHz} \quad (50)$$

A perda do caminho para áreas suburbanas é calculada através da Equação 51 e para áreas abertas pela Equação 52.

$$L_{50}(dB) = L_{50}(\text{urbano}) - 2 \left[\log \frac{f_c}{28} \right]^2 - 5,4 \quad (51)$$

$$L_{50}(dB) = L_{50}(\text{urbano}) - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94 \quad (52)$$

O modelo de Hata é uma simplificação do modelo de Okumura, mas as previsões desses modelos são semelhantes, desde que d ultrapasse 1 km (RAPPAPORT, 2009).

2.3.3.3 Modelo COST-231

A *European Cooperation in Science and Technology* (EURO-COST) criou modelo COST-231, também conhecido como extensão *Personal Communications Services* (PCS) do modelo Hata, é uma versão do modelo Hata que inclui a faixa de frequência de 1.500 MHz a 2.000 MHz. Assim como no modelo Hata, a distância entre transmissor e receptor d pode variar de 1 km a 20 km, a altura efetiva da antena de transmissão h_{te} de 30 m a 200 m e a altura efetiva da antena de recepção h_{re} de 1 m a 10 m. A perda do caminho é dada por,

$$L_{50}(dB) = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d + C \quad (53)$$

onde $a(h_{re})$ é calculado de acordo com as Equações 48, 49 e 50. A constante C é igual a 0 dB para cidades de tamanho médio e áreas suburbanas e é 3 dB para centros metropolitanos (SEYBOLD, 2005).

2.3.3.4 Recomendação ITU-R P. 1546-6

A União Internacional de telecomunicação (*International Telecommunication Union – ITU*) é uma agência das Nações Unidas especializada em tecnologias de informação e comunicação. Foi fundada no ano de 1865 com o objetivo de facilitar a conectividade internacional em redes de comunicação. Atualmente, 193 Estados e cerca de 900 empresas, universidades e organizações internacionais e regionais fazem parte dos membros associados (ITU, 2020). A ITU é organizada em três setores correspondentes as principais áreas de atuação:

- *ITU – Radiocommunication Sector* (ITU-R);
- *ITU – Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T);
- *ITU – Telecommunication Development Sector* (ITU-D).

O papel do ITU-R é coordenar os serviços de radiocomunicação, bem como a gestão internacional do espectro de radiofrequência e órbitas de satélites. O ITU-T fornece os padrões internacionais conhecidos como recomendações ITU-T que facilitam a comunicação global. O ITU-D é responsável por propiciar o desenvolvimento e melhoria de equipamentos e redes de telecomunicações (ITU, 2020).

As recomendações ITU-R constituem um conjunto de normas técnicas internacionais aprovadas pelos Estados-Membros da ITU e estão subdivididas em 16 áreas de interesse. A *radiowave propagation* (ITU-R P.) é uma das áreas abordadas e trata da propagação de ondas de rádio. A implementação dessas recomendações não é obrigatória, mas devido à credibilidade dos estudos que são realizados por especialistas em radiocomunicações de todo o mundo, elas são implementadas ou utilizadas como referência mundialmente.

Segundo a Resolução nº 398 da Anatel (2005), os estudos de viabilidade técnica para prestação de serviço de radiodifusão de sons e imagens e de retransmissão de televisão devem ser elaborados de acordo com a Recomendação ITU-R P. 1546-1 (ANATEL, 2005). Sua versão atual, a Recomendação ITU-R P.1546-6: *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4.000 MHz* (ITU, 2019), descreve um método para previsão de propagação de rádio ponto-a-área para serviços terrestre na faixa de

frequência de 30 MHz a 4.000 MHz. As previsões são obtidas através de curvas de propagação derivadas de medições relacionadas às condições climáticas de regiões temperadas da Europa e América do Norte para caminhos terrestres e regiões do Mediterrâneo e Mar do Norte para caminhos marítimos.

Essa recomendação é válida para a faixa de frequências de 30 MHz a 4.000 MHz, como indicado no título, para caminhos terrestre, marítimo e misto com distâncias entre as antenas de transmissão e recepção de até 1.000 km e a altura da antena de transmissão de até 3.000 m. O modelo ITU-R P. 1546 considera variabilidade local de 50 %, o que significa que 50% da área, provavelmente, é coberta por uma intensidade de campo maior que o valor tabulado. Também é considerado variabilidade de tempo, onde são aplicadas porcentagens de tempo de 1% a 50%. Uma variabilidade temporal de 50 %, por exemplo, indica que o campo predito será maior ou igual em 50% do tempo.

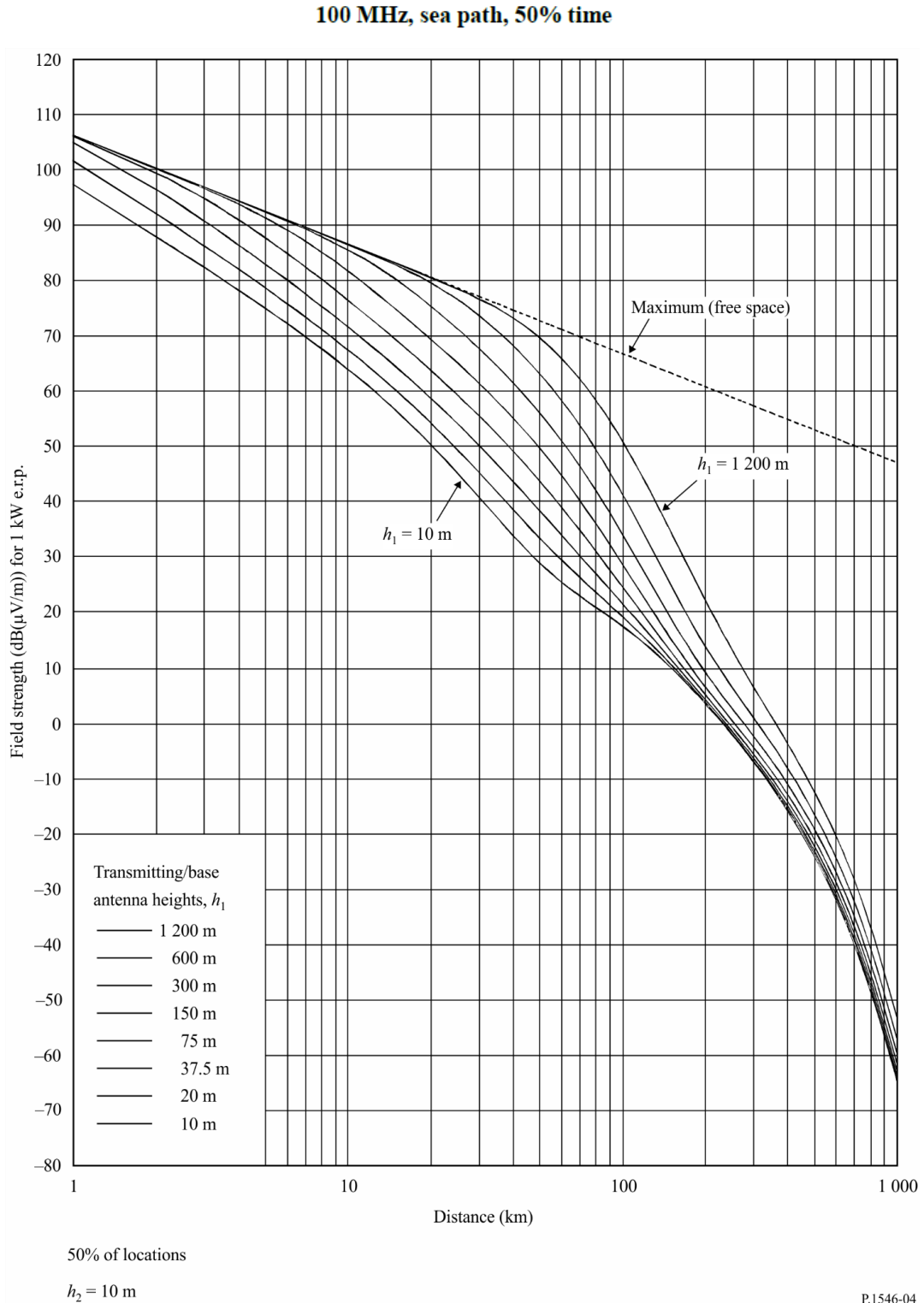
As curvas apresentam valores de intensidade de campo para condições específicas: ERP de 1 kW nas frequências nominais de 100 MHz, 600 MHz e 2.000 MHz, caminhos terrestres e marítimos, cobrem distâncias entre 1 km e 1.000 km e alturas da antena de transmissão 10 m, 20 m, 37,5 m, 75 m, 150 m, 300 m, 600 m e 1.200 m. A altura efetiva da antena de recepção em caminhos terrestres é igual à altura representativa da cobertura do solo em torno do local, ou 10 m, o que for mais alto. Para caminhos marítimos, as curvas fornecem valor de intensidade de campo para altura da antena de recepção igual a 10 m. A variabilidade temporal possui valores de 1%, 10% e 50% e a variabilidade de localização é fixada em 50 %.

A Figura 11 é um exemplo das curvas que são apresentadas na recomendação, nesse caso a intensidade campo pode ser obtida para frequência de 100 MHz, em caminhos marítimos e porcentagem de tempo de 50%. No entanto, são apresentados métodos de interpolação/extrapolação das curvas e correções de alguns parâmetros para obter valores de intensidade de campo para condições diferentes dos valores tabulados, respeitando os limites estabelecidos.

A ITU-R P.1546-6 é composta por 8 anexos que apresentam os procedimentos para a previsão de intensidade de campo. O Anexo 1 define os termos técnicos utilizados ao longo da recomendação. As curvas de propagação são apresentadas nos Anexos 2, 3 e 4. O Anexo 5 apresenta informações e métodos de cálculos de interpolação/extrapolação para valores e parâmetros diferentes dos encontrados nas curvas. O procedimento detalhado para aplicação da recomendação é apresentado no Anexo 6. Tendo em vista que as curvas de intensidade de campo aplicam-se a climas temperados, o Anexo 7 fornece um ajuste das curvas para

diferentes regiões do mundo com base nos dados do gradiente de refração atmosférica. Por fim, o Anexo 8 descreve condições sob as quais a Recomendação ITU-R P. 1546-6 fornece resultados compatíveis com o modelo de Hata.

Figura 11 – Exemplo de um dos gráficos disponíveis na Recomendação ITU-R P. 1546-6



Fonte: ITU (2019)

Portanto, a intensidade de campo pode ser obtida diretamente dos gráficos apresentados nos Anexos 2, 3 e 4 quando os parâmetros reais coincidem com os que foram utilizados para obter as curvas. Para valores e condições diferentes é necessário realizar interpolação ou extrapolação de acordo com o método fornecido na Recomendação ITU-R P. 1546-6. O Anexo 5 descreve como as intensidades de campo são extraídas das famílias de curvas por meio de interpolação/extrapolação para altura da antena de transmissão, distância entre as antenas de transmissão e recepção, frequência e tempo percentual. A seguir é descrito, resumidamente, o procedimento de cálculo desses parâmetros.

- **Altura da Antena de Transmissão**

No caso em que a altura da antena de transmissão não coincide com as oito alturas para as quais as curvas de intensidade de campo são fornecidas, são elas: 10 m, 20 m, 37,5 m, 75 m, 150 m, 300 m, 600 m e 1.200 m, a intensidade de campo necessária, para valores de altura da antena de transmissão na faixa de 10 m a 3.000 m, deve ser interpolada ou extrapolada a partir das intensidades de campo de duas curvas usando a Equação 54.

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \left[\frac{\log\left(\frac{h_1}{h_{inf}}\right)}{\log\left(\frac{h_{sup}}{h_{inf}}\right)} \right] \quad (54)$$

Onde E é a intensidade de campo em dB ($\mu\text{V}/\text{m}$), h_1 é a altura efetiva da antena transmissora em metros, h_{inf} é a altura efetiva nominal imediatamente inferior a h_1 , h_{sup} é a altura efetiva nominal imediatamente superior a h_1 , E_{inf} é a intensidade de campo correspondente a h_{inf} para uma determinada distância e E_{sup} é a intensidade de campo correspondente a h_{sup} para uma determinada distância. Quando a altura da antena de transmissão é inferior a 10 m ou menor que zero, a recomendação fornece outros métodos (ITU, 2019).

- **Distância**

Os gráficos fornecem a intensidade de campo em função das distâncias que variam de 1 km a 1.000 km. Caso a distância não coincida com um dos valores apresentados na Tabela 1

da Recomendação ITU-R P. 1546-6, a intensidade de campo E [dB(μ V/m)], deve ser interpolada linearmente para o logaritmo da distância através da Equação 55.

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \left[\frac{\log\left(\frac{d}{d_{inf}}\right)}{\log\left(\frac{d_{sup}}{d_{inf}}\right)} \right] \quad (55)$$

Onde d é a distância para qual a previsão é desejada, d_{inf} é a distância de tabulação imediatamente inferior a d , d_{sup} é a distância de tabulação imediatamente superior a d , E_{inf} é a intensidade de campo para d_{inf} e E_{sup} é a intensidade de campo para d_{sup} . Este procedimento é válido apenas para distâncias até 1.000 km (ITU, 2019).

- **Frequência**

Os valores de intensidade de campo para a frequência necessária devem ser obtidos interpolando os valores de frequência nominal de 100 MHz, 600 MHz e 2.000 MHz. Para os casos em que a frequência está abaixo de 100 MHz ou acima de 2.000 MHz é necessário fazer extrapolação dos dois valores nominais de frequência mais próximos. Ainda é fornecido um método alternativo para caminhos marítimos em que a frequência é inferior a 100 MHz.

A intensidade de campo E para caminhos terrestres e marítimos em frequência superior a 100 MHz é obtida por meio da Equação 56.

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \left[\frac{\log\left(\frac{f}{f_{inf}}\right)}{\log\left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}}\right)} \right] \quad (56)$$

Onde f é a frequência para qual a previsão é necessária, f_{inf} é a frequência nominal inferior (100 MHz para $f < 600$ MHz e 600 MHz caso contrário), f_{sup} é a frequência nominal superior (600 MHz para $f < 600$ MHz e 2.000 MHz caso contrário), E_{inf} é a intensidade de campo para f_{inf} e E_{sup} é a intensidade de campo para f_{sup} (ITU, 2019).

- **Porcentagem de Tempo**

Os valores de intensidade de campo para uma determinada porcentagem de tempo devem ser calculados por interpolação para os intervalos de 1% a 10% e 10% a 50% usando a Equação 57.

$$E = E_{sup} \frac{(Q_{inf} - Q_t)}{(Q_{inf} - Q_{sup})} + E_{inf} \frac{(Q_t - Q_{sup})}{(Q_{inf} - Q_{sup})} \quad (57)$$

Onde t é a porcentagem de tempo para o qual a previsão é necessária, t_{inf} é a porcentagem de tempo nominal inferior, t_{sup} é a porcentagem de tempo nominal superior, Q_t é igual a $Q_i(t/100)$, Q_{inf} é igual a $Q_i(t_{inf}/100)$, Q_{sup} é igual a $Q_i(t_{sup}/100)$, E_{inf} é a intensidade de campo para a porcentagem de tempo t_{inf} e E_{sup} é a intensidade de campo para a porcentagem de tempo t_{sup} . O termo $Q_i(x)$ é a função de distribuição normal cumulativa complementar inversa, uma aproximação para $Q_i(x)$ é mostrada na Recomendação ITU-R P. 1546-6. Esta recomendação não é válida para porcentagens de tempo superiores a 50% (ITU, 2019).

- **Perda de Transmissão**

A perda de transmissão básica L_b (dB) que corresponde a uma determinada intensidade de campo E [dB(μ V/m)] para 1 kW e.r.p. é dada por

$$L_b = 139,3 - E + 20 \log f \quad (58)$$

onde f é a frequência em MHz. Outros ajustes são fornecidos, por exemplo, para caminho misto terra-mar, distâncias menores que 1 km e correções a serem adicionadas para melhorar a previsão, eles podem ser consultados em detalhes em ITU (2019).

- **Comparação com o modelo de Hata**

A Recomendação ITU-R P. 1546-6 fornece resultados compatíveis com o modelo de Hata para distâncias de até 10 km e altura da antena receptora de 1,5 m. O Anexo 8 da

recomendação apresenta a equação para calcular a intensidade de campo em dB pelo modelo de Hata,

$$E = 69,82 - 6,16 \log f + 13,82 \log h_1 + a(h_2) - (44,9 - 6,55 \log h_1)(\log d)^b \quad (59)$$

onde E é a intensidade de campo em dB(μ V/m), f é a frequência em MHz, h_1 é a altura efetiva da antena de transmissão na faixa de 30 a 200 m, h_2 é a altura da antena de recepção na faixa de 1 a 10 m, d é a distância em km e $a(h_2)$ é calculado através da Equação 48. O valor de b é 1 para distâncias menores ou igual a 20 km, para distâncias maiores que 20 km a Recomendação ITU-R P. 1546-6 fornece uma fórmula para determinar o valor de b (ITU, 2019).

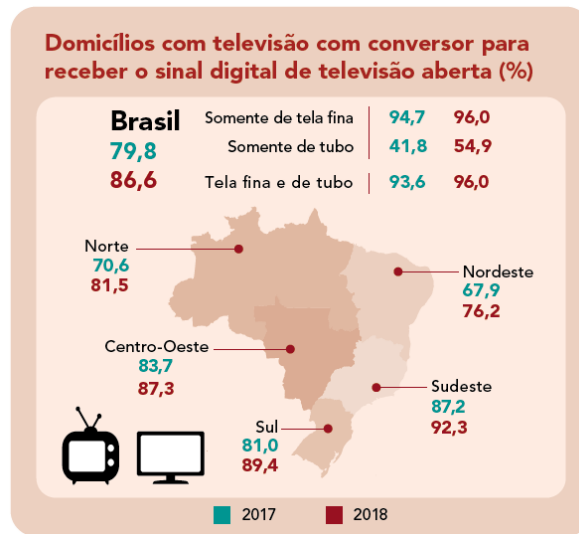
3 TELEVISÃO DIGITAL TERRESTRE

A televisão brasileira chegou aos 70 anos no dia 18 de setembro de 2020. Desde a primeira transmissão aberta da TV Tupi, o sistema de televisão avançou rapidamente até a “era digital” (FRANCFORT; VIEL, 2020). No Brasil, a TV digital terrestre teve início com o Decreto nº 4.901/2003 que estabeleceu o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD). A implantação do SBTVD só aconteceu após a publicação do Decreto nº 5.820/2006, que, inicialmente, previa o desligamento total do sinal analógico para 2016. No entanto, o cronograma de desligamento do sinal analógico sofreu algumas modificações e atualmente está previsto para dezembro de 2023 (CARDOSO, 2018).

Segundo o IBGE (2018), a investigação realizada no quarto trimestre de 2018 pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua) revela que houve redução do número de domicílios com televisão entre 2017 e 2018. Em 2018, dos 71,7 milhões de domicílios particulares permanentes do país, em 96,4% havia televisão, enquanto que, em 2017 eram 96,7%. Nesse mesmo período houve aumento no número de domicílios com televisor de tela fina (de 69,8% para 74,3%) e redução de domicílios com televisor de tubo (de 38,8% para 31,9%). A parcela de domicílios que tinham somente televisor de tela fina alcançou 64,5%, enquanto a parcela de domicílios somente com televisor de tubo baixou para 22,1%.

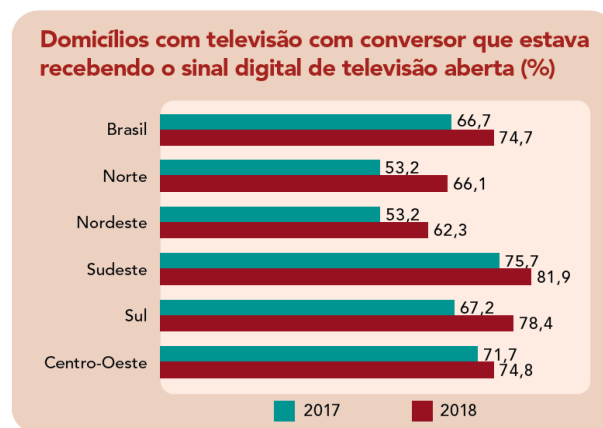
Em 2018, com o processo de implantação do sinal digital em andamento, 86,6% dos domicílios com televisão já tinham o conversor para receber o sinal digital de televisão aberta, ainda que não o estivesse captando. Isso representa um aumento significativo em relação ao ano de 2017, onde o percentual era 79,8%. A Figura 12 apresenta a porcentagem de domicílios com televisão com conversor digital nos anos de 2017 e 2018 para cada região. Os maiores avanços ocorreram nas regiões Norte e Nordeste, no entanto, a região Sudeste permanece com o percentual mais elevado. Dos domicílios com conversor digital, a parcela que estava recebendo sinal digital passou de 66,7% em 2017 para 74,7% em 2018. Na Figura 13, é possível ver o avanço em cada região.

Figura 12 – Porcentagem de domicílios com conversor digital



Fonte: IBGE (2018)

Figura 13 – Porcentagem de domicílios com conversor digital recebendo sinal digital



Fonte: IBGE (2018)

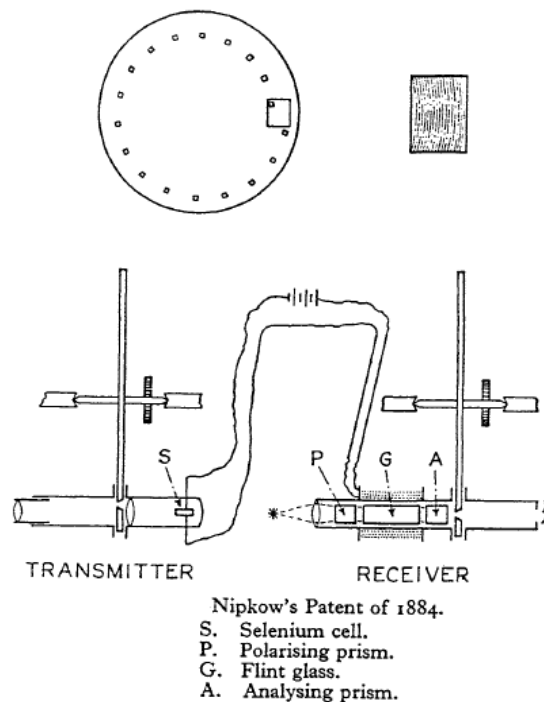
O maior percentual de domicílios recebendo sinal digital continua sendo na região Sudeste (81,9%) e o menor na região Nordeste (62,3%). Quando a transmissão do sinal analógico for completamente desligada, o acesso a canais de televisão aberta não será possível sem o conversor digital, a não ser por antena parabólica ou televisão por assinatura. Esse estudo mostrou que houve uma rápida redução de domicílios sem nenhuma dessas opções de acesso à televisão aberta, o percentual caiu de 6,2% para 3,1% de 2017 para 2018 (IBGE, 2018).

3.1 Histórico da Televisão

O atual sistema de televisão se deve a contribuição de muitos cientistas ao longo de décadas. Grandes descobertas no campo científico no fim do século XIX e início século XX possibilitaram o fomento da radiodifusão televisiva. Serão destacados alguns dos fatos que alicerçaram e contribuíram para o progresso da televisão, tendo em vista que muitas pesquisas foram desenvolvidas simultaneamente no mundo e por isso há divergências em relação ao seu surgimento.

A invenção da televisão só foi possível devido às descobertas do selênio por Jöns Jacob Berzelius no ano de 1817 e de suas propriedades fotocondutoras por Willoughby Smith em maio de 1873. Logo após, muitos inventores, cientistas e engenheiros em vários países buscaram maneiras de transmitir e visualizar imagens estáticas por meio da eletricidade utilizando a rede de telegrafia existente. Um dos cientistas que ganhou mais destaque foi o alemão Paul Gottlieb Nipkow. Em 1884, Paul Nipkow patenteou um sistema mecânico de transmissão de imagens à distância, conhecido como Disco de Nipkow, que foi empregado por inventores e organizações até a década de 1930 (BURNS, 1998). A Figura 14 mostra o esquema de Nipkow.

Figura 14 – Proposta de Nipkow patenteada na Alemanha em 1884



Fonte: BURNS (1998)

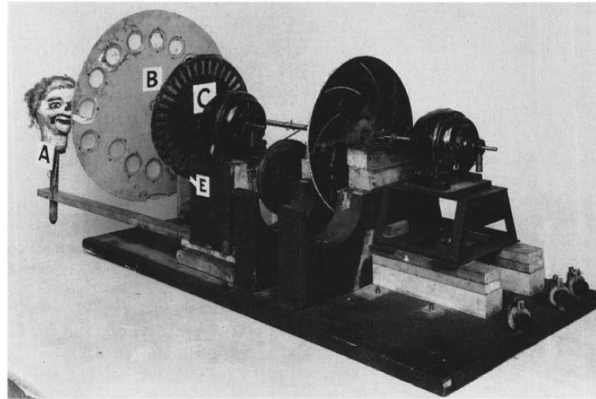
O sistema proposto por Nipkow consistia de um disco de varredura rotativo com 24 perfurações deslocadas igualmente ao longo de uma linha espiral em torno de sua borda. Cada uma das perfurações permitia que um fluxo de luz correspondente ao brilho de um elemento de imagem incidisse na célula de selênio, S, através da lente do condensador. Dessa forma, cada perfuração produzia uma linha da imagem e, após uma rotação do disco, toda a imagem projetada era escaneada em 24 linhas.

Na extremidade receptora, as correntes do sinal de imagem alimentam o modulador de luz PGA por meio de um único fio. O princípio de funcionamento deste modulador foi fundamentado no efeito magneto-óptico de Faraday. O campo magnético estabelecido pela corrente que flui na bobina, G (situada entre os prismas Nicol cruzados P e A no tubo de vidro), rotaciona o plano de polarização da luz emitida pela fonte. Consequentemente, o brilho do elemento da imagem visto atrás do analisador, A, varia de acordo com a corrente. A imagem completa é sintetizada por uma combinação do disco de varredura do receptor e o fenômeno da persistência da visão (BURNS, 1998).

Nipkow não fez nenhuma tentativa de colocar suas ideias em prática. Mesmo que sua invenção pudesse ser empregada para analisar a imagem de um objeto ou cena a ser televisionado, não seria possível usar para sintetizar imagens em um sistema de tela grande, tendo em vista as fontes de luz controláveis disponíveis. Enquanto os inventores buscavam soluções conhecidas para os problemas envolvendo a transmissão e recepção de imagens à distância, outros cientistas estavam engajados em pesquisas físicas fundamentais (BURNS, 1998). Em 1887, Heinrich Rudolph Hertz comprovou a existência de ondas eletromagnéticas, revolucionando a telegrafia, até então, realizada através de fios metálicos. O trabalho de Hertz viria a ser fundamental para o funcionamento da televisão (PADUAN, 2012).

O engenheiro eletricitista escossês Jonh Logie Baird iniciou suas pesquisas para o desenvolvimento da televisão por volta de 1922-1923. E em janeiro de 1926, realizou a primeira demonstração pública de televisão mecânica, na ocasião, foram exibidas imagens grosseiras para membros do *Royal Institution* em Londres. Os primeiros aparelhos produzidos por Baird foram baseados nas propostas de Nipkow e outros cientistas do final do século XIX e início século XX (BURNS, 1998). A Figura 15 mostra o aparelho de televisão desenvolvido por Baird. Ele progrediu no desenvolvimento do seu modelo de televisão e em 1929 a rádio estatal britânica *British Broadcasting Corporation* (BBC) firmou um acordo para a transmissão de programas televisuais regularmente, fora das horas normais dos programas radiofônicos. Dando início a “era da televisão” (FRANCFORT; VIEL, 2020).

Figura 15 – Aparelho de televisão Baird, que está no Museu da Ciência em Londres



Fonte: BURNS (1998)

Ainda no ano de 1923, Vladimir Kosma Zworykin patenteou o iconoscópio, dispositivo utilizado em câmeras de televisão. Consistia em um tubo de vácuo que captava as imagens e as armazenava em uma superfície fotossensível em forma de cargas para serem lidas através de um feixe de raios catódicos controlado por campo magnético (BURNS, 1998). Zworykin também criou o cinescópico (ou tubo de raios catódicos), um tubo de televisão onde apareciam as imagens. Esses dois componentes tornou possível a criação de um sistema de televisão eletrônico (FRANCFORT; VIEL, 2020).

Em janeiro de 1927, com apenas 20 anos de idade o norte-americano Philo Taylor Farnsworth patenteou o dissegador de imagens. No sistema proposto, uma imagem eletrônica do objeto em movimento era eletricamente varrida sequencialmente por uma abertura estacionária e os elétrons que passavam eram coletados por um eletrodo. No dia 2 de setembro de 1928, pela primeira vez, foi demonstrado publicamente um sistema de televisão totalmente eletrônico (BURNS, 1998).

A partir de 1927, a evolução da televisão ocorreu cada vez mais rápida. E na década de 1930 surgiram as primeiras emissoras de TV. O desenvolvimento da televisão foi interrompido durante o período em que ocorreu a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) e só foi retomado com o fim da guerra. Na década de 1950 já era possível assistir televisão em cores nos Estados Unidos (PADUAN, 2012).

Uma nova era da televisão surgiu quando cientistas da televisão japonesa *Nippon Hoso Kyokai* (NHK) começaram a realizar pesquisas para desenvolver um sistema de televisão de alta definição (*Higt Definition Television – HDTV*) por volta da década de 1970. Isso estimulou a comunidade científica de diferentes países a desenvolver seus próprios padrões, resultando na criação do padrão de televisão digital americano *Advanced Television Systems*

Committee (ATSC), o europeu *Digital Video Broadcasting – Terrestrial* (DVB-T) o japonês *Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial* (ISDB-T) e o chinês *Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting* (DTMB) (ALENCAR, 2009; PADUAN, 2012).

3.1.1 A televisão no Brasil

Os primeiros registros que se tem da televisão no Brasil datam junho de 1939, quando houve a demonstração da televisão na Feira de Amostras do Rio de Janeiro. Ela foi trazida pelo governo alemão, em parceria com o presidente Getúlio Vargas. A Figura 16 mostra um dos receptores apresentados na ocasião. Em 1950, o jornalista Assis Chateaubriand fundou a primeira emissora de televisão do Brasil e da América do Sul. O canal VHF-3 foi designado para operação da TV Tupi que se identificava pelo seu prefixo PRF-3-TV (FRANCFORT; VIEL, 2020).

Figura 16 – Um dos receptores *Telefunken* utilizados na primeira demonstração de TV no Brasil



Fonte: FRANCFORT e VIEL (2020)

A Empresa Brasileira de Telecomunicações (Embratel) surgiu em setembro de 1965 e foi a responsável pela construção da primeira estação a captar sinais de satélite para o sistema de televisão à longa distância. A televisão brasileira entrou na “era das comunicações via satélite” em 28 de fevereiro de 1969, quando foi inaugurada a Estação Tanguá I, no município

de Itaboraí. Em 20 de julho de 1969, as emissoras de TV transmitiram em tempo real a chegada do homem à Lua e em junho de 1970, o Brasil pode assistir a Copa do Mundo de Futebol, diretamente do México, via Embratel (ABERT, 2020a).

A transmissão da Festa da Uva (Caxias do Sul - RS), em fevereiro de 1972, marcou o início das transmissões em cores no país (ABERT, 2020a), utilizando o sistema de televisão em cores PAL-M (ALENCAR, 2009). A TV em cores é inaugurada em todo o país em 31 de março de 1972. Na ocasião foram exibidos discursos de autoridades como o presidente da República, o General Emilio Garrastazu Médici, e o Ministro das Comunicações Higinio Corsetti (ABERT, 2020a).

3.1.2 Era digital

Em 1998, a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) recebeu do Ministério das Comunicações (MC) a incumbência de dar prosseguimento aos estudos para implantação da TV Digital. O Decreto nº 4.901 publicado em 26 de novembro de 2003 estabeleceu as diretrizes para a implantação do Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) e criou dois comitês e um grupo gestor (ANATEL, 2020c):

- Comitê de Desenvolvimento, vinculado à Presidência da República, com membros da Casa Civil e Ministérios, responsável pelas decisões políticas que envolvem o SBTVD;
- Comitê Consultivo, composto por entidades que desenvolvem tecnologia de televisão digital;
- Grupo Gestor, grupos técnicos com a finalidade de desenvolver atividades específicas.

Com a publicação da Resolução nº 398/2005, a Recomendação ITU-R P.1546 foi escolhida como método para modelar a propagação de sinal digital. E a Resolução nº 407/2005 aprovou o Plano Básico de Distribuição de Canais de Televisão Digital (PBTVD) (ANATEL, 2020c).

A publicação do Decreto nº 5.820 (BRASIL, 2006), em 29 de junho de 2006, definiu o padrão ISDB-T para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital – Terrestre (SBTVD-T). Também foi instituído o Fórum SBTVD-T que deveria ser composto por representantes do setor de radiodifusão, do setor industrial e da comunidade científica e tecnológica, entre outros, com a função de assessorar o Comitê de Desenvolvimento. Estabeleceram-se as

diretrizes para o período de transição do sistema de transmissão analógica para o sistema de transmissão digital. E foram criados 4 canais para exploração direta pela União Federal:

- Canal do Poder Executivo, para transmissão de atos, trabalhos, projetos, sessões e eventos do Poder Executivo;
- Canal de Educação, para transmissão destinada ao desenvolvimento e aprimoramento, entre outros, do ensino à distância de alunos e capacitação de professores;
- Canal de Cultura, para transmissão destinada a produções culturais e programas regionais;
- Canal de Cidadania, para transmissão de programações das comunidades locais, bem como para divulgação de atos, trabalhos, projetos, sessões e eventos dos poderes públicos federal, estadual e municipal.

Em 2007, iniciaram as transmissões comerciais da televisão digital no Brasil, na cidade de São Paulo (ANATEL, 2020c). No dia 2 de dezembro de 2007, a TV digital foi oficialmente inaugurada no Brasil, onde estavam presentes as principais redes de televisão, o presidente da República Luiz Inácio Lula da Silva, a Ministra da Casa Civil Dilma Rousseff e o Ministro das Comunicações Hélio Costa (ABERT, 2020a).

A Resolução nº 583/2012 determinou a canalização para TV digital em VHF (174 MHz – 216 MHz) e UHF (470 MHz – 800 MHz) (ANATEL, 2012). E em 2013, a Portaria nº 14/2013 (MC, 2013) estabeleceu as diretrizes para a aceleração do acesso ao SBTVD-T e para a ampliação da disponibilidade de espectro de radiofrequência para atendimento dos objetivos do Programa Nacional de Banda Larga (PNBL). Foi determinado que a ANATEL iniciasse os procedimentos de verificação da viabilidade da atribuição, destinação e distribuição da faixa de 698 MHz a 806 MHz para atendimento dos objetivos do PNBL. A Anatel aprovou, por meio da Resolução nº 625/2013 (ANATEL, 2013), a atribuição da faixa de radiofrequências de 698 MHz a 806 MHz adicionalmente ao serviço móvel, mantendo a continuidade do serviço de televisão até o fim do processo de transição do analógico para o digital.

Em 20 de junho de 2014, a Portaria nº 477/2014 estabeleceu o cronograma de transição da transmissão analógica para o SBTVD-T. E a publicação da Portaria nº 481/2014, em de 9 de julho de 2014, estabelece a condição para o desligamento da transmissão analógica de que, pelo menos, 93% dos domicílios do município que acessem o serviço livre, aberto e gratuito por transmissão terrestre, estejam aptos à receber o sinal digital de televisão (ANATEL, 2020c).

Ainda no ano de 2014, a Anatel publicou o edital referente ao leilão da faixa de radiofrequências de 700 MHz para o uso do sistema de quarta geração de telefonia móvel (4G). O leilão, ocorrido em 30 de setembro de 2014, arrecadou cerca de 9 bilhões de reais, dos quais parte foi destinado para cumprir o desligamento do sinal analógico. O processo de transição do sinal analógico para o digital da TV aberta e a subsequente implantação do 4G LTE na faixa de 700 MHz é coordenado pelo Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV (GIRED).

O GIRED é composto por um Conselheiro Diretor da Anatel, representantes do Ministério das Comunicações, das empresas de telecomunicações que adquiriram a faixa na licitação e dos radiodifusores. Este grupo tem a função de acompanhar, disciplinar e fiscalizar o trabalho da Entidade Administradora do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV (EAD), formada pelas empresas de telecomunicações vencedoras do leilão e incumbida de operacionalizar e divulgar o processo de transição (ANATEL, 2020c).

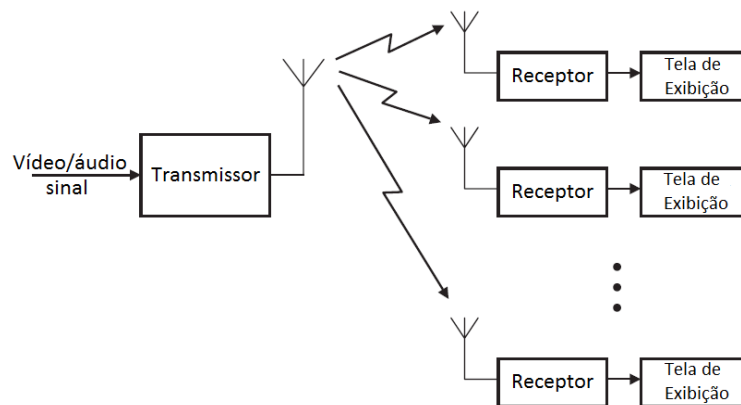
Em março de 2016, foi desligado o sinal analógico de televisão em Rio Verde – GO, a cidade piloto no processo de digitalização da TV aberta brasileira (ANATEL, 2019). A primeira fase do desligamento da TV analógica no Brasil foi concluída em 2019, atingindo 1.378 municípios brasileiros, 130 milhões de pessoas, todas as capitais brasileiras, o Distrito Federal, e os estados de São Paulo e Rio de Janeiro (ANATEL, 2020c). O desligamento total do sinal analógico está previsto para 31 de dezembro de 2023 (MCTIC, 2016).

A digitalização do sinal de TV ainda é um desafio a ser vencido, mas sua implantação tem acontecido de forma eficiente e já é uma realidade em muitos lugares do Brasil. Desde a primeira transmissão televisiva, em 1950, o Brasil tem alcançado grandes conquistas no sistema televisivo. No dia 28 de julho de 2020, foi publicada a Portaria Interministerial nº 40 (ME; MCTI, 2020), que altera o Processo Produtivo Básico para o produto Televisor com Tela de Cristal Líquido, industrializado na Zona Franca de Manaus. Essa portaria estabelece um prazo de até 2023 para que 90% dos televisores com tela de cristal líquido fabricados no Brasil, com conexão à internet (*Smart TVs*), incorporem a capacidade de executar aplicações interativas radiodifundidas (*middleware* Ginga), conforme definido na Seção 9 da ABNT NBR 15606-1. Deve ser incluído nos televisores o DVT Play, perfil D do *middleware* Ginga. Isso irá proporcionar interatividade entre *broadcast* (TV aberta) e *broadband* (banda larga). Esse é mais um passo para a evolução do Sistema Brasileiro de Televisão Digital e abre caminho para a próxima geração da televisão (TV 3.0) (ABERT, 2020b).

3.2 Sistema de Televisão Digital Terrestre

O sistema de televisão pode ser executado em três modalidades: televisão terrestre, televisão por satélite e televisão a cabo. Toda a explicação será voltada para o sistema de televisão terrestre, tendo em vista o tema central desta dissertação. Um sistema de transmissão terrestre é composto por uma antena transmissora, instalada em uma torre alta, que transmite um sinal para um grande número de receptores, conforme mostrado na Figura 17. Cada receptor decodifica a informação transmitida e exibe em uma tela. O receptor e a tela podem ser integrados em um único dispositivo ou podem ser dispositivos separados. Os sistemas de televisão por satélite e a cabo operam em modelos semelhantes (ARNOLD; FRATER; PICKERING, 2007).

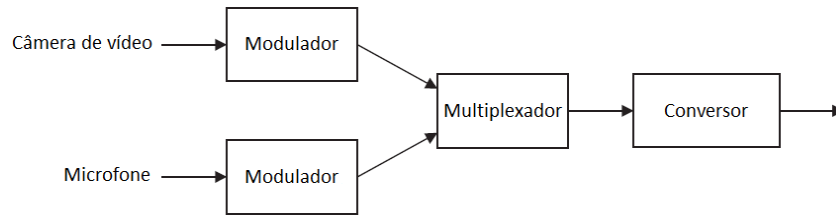
Figura 17 – Estrutura da televisão de transmissão terrestre



Fonte: Adaptado de ARNOLD, FRATER e PICKERING (2007)

Até o ano de 2007, quando foi inaugurado o sistema de televisão digital, o serviço de transmissão no Brasil era exclusivamente analógico. De acordo com Arnold, Frater e Pickering (2007), em um sistema de transmissão analógico, os sinais de áudio e vídeo, que podem ser derivados de câmeras e microfones ou de dispositivos de armazenamento, são modulados separadamente e em seguida multiplexados e convertidos para formar o sinal de transmissão, Figura 18. Os padrões de televisão analógica fornecem vários métodos de modulação, multiplexação e conversão. Eles têm a função de regular o funcionamento do sistema de televisão, tornando possível o acesso a TV aberta por todos os receptores que estão de acordo com o padrão adotado.

Figura 18 – Estrutura básica do sistema de televisão analógico



Fonte: Adaptado de ARNOLD, FRATER e PICKERING (2007)

Os sistemas de televisão em cores analógicos mais utilizados no mundo são (ALENCAR, 2009):

- *National Television System Committee* (NTSC), desenvolvido nos Estados Unidos e em operação a partir de 1954;
- *Phase Alternating Line* (PAL), criado na Alemanha no fim da década de 1960;
- *Séquentielle Couleur Avec Mémoire* (SECAM), em operação a partir de 1967 na França.

Desde sua primeira transmissão em cores, no ano de 1972, o Brasil adotou o padrão PAL-M, que utiliza o sistema de codificação de cores PAL em uma subportadora, no padrão M de formação de imagem. O padrão foi especialmente desenvolvido pela empresa alemã *Telefunken* para o Brasil, para atender a frequência da rede elétrica de 60 Hz, já que as outras derivações do sistema PAL utilizavam frequência de 50 Hz. O padrão PAL-M tem resolução de 525 linhas, taxa de repetição de repetição de 29,97 quadros por segundo (padrão M), frequência horizontal de 15.750 kHz, frequência vertical de 60 Hz, a frequência de portadora de cor é 3,575611 MHz, frequência da portadora de vídeo de 4,2 MHz, frequência da portadora de áudio de 4,5 MHz e largura de banda de 6 MHz (ALENCAR, 2009).

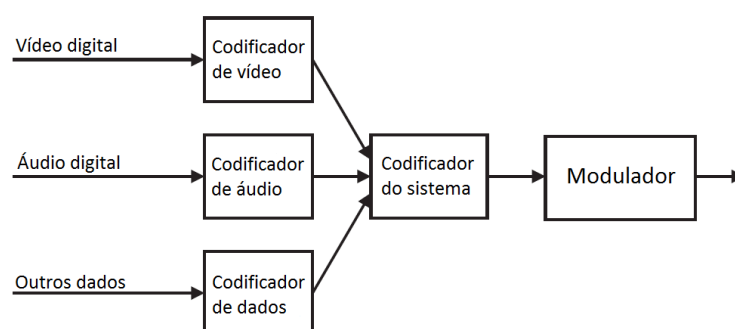
Do ponto de vista da comunicação, a mudança para o sistema digital de transmissão possui muitas vantagens. No sistema de comunicação analógico, os efeitos da distorção do sinal e do ruído do canal são cumulativos, o que torna difícil oferecer um nível aceitável de desempenho na recepção. O uso de repetidores na forma de amplificadores não ajuda muito, pois o sinal de mensagem e o ruído são amplificados na mesma extensão. Já no sistema de comunicação digital o uso de repetidores regenerativos colocados ao longo do caminho de transmissão podem praticamente eliminar os efeitos degradantes do ruído do canal e distorção do sinal. Diferentemente do sistema de comunicação analógico, o sistema de comunicação digital pode suportar os efeitos do ruído do canal e distorção do sinal, desde que estes sejam mantidos sob certos limites. Técnicas poderosas de codificação de controle de erros

umentam a confiabilidade do sistema digital, de forma que a estimativa de um sinal recebido é quase indistinguível do sinal transmitido.

Os sistemas de comunicação digital ainda podem se tornar altamente seguros, explorando poderosos algoritmos de criptografia que dependem do processamento digital para sua implementação. Os sistemas de comunicação digital também são mais eficientes do que os sistemas de comunicação analógica em termos de largura de banda de transmissão e relação sinal-ruído. Utilizando comunicação digital é possível a integração de sinais analógicos digitalizados (sinais de voz e vídeo) com dados de computador digital, o que não é possível com comunicações analógicas (HAYKIN; MOHER, 2007).

A Figura 19 apresenta a estrutura básica de um sistema digital de transmissão, onde são mostrados codificadores para cada tipo de sinal, um codificador de sistema que multiplexa os sinais de saída e um modulador que converte o fluxo de bits multiplexado em uma forma adequada para transmissão no canal de propagação (ARNOLD; FRATER; PICKERING, 2007). O sistema de televisão digital é composto por três componentes básicos: áudio, vídeo e interatividade. O áudio e vídeo representam os serviços essenciais da televisão. O termo interatividade abrange diferentes tipos de serviços que inclui a interação do usuário com o fornecedor do serviço, como guia de programação eletrônico, acesso à internet e compra de produtos. O *middleware* é a camada de software que possibilita serviços interativos na TV digital (ALENCAR, 2009).

Figura 19 – Estrutura básica do sistema de televisão digital



Fonte: Adaptado de ARNOLD, FRATER e PICKERING (2007)

Os sistemas de televisão digital são brevemente descritos na Seção 3.3. Há quatro sistemas principais de televisão digital em operação no mundo (ITU, 2016):

- *Advanced Television Systems Committee* (ATSC), padrão norte-americano;
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* (DVB-T), padrão europeu;

- *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial* (ISDB-T), padrão japonês;
- *Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting* (DTMB), padrão chinês.

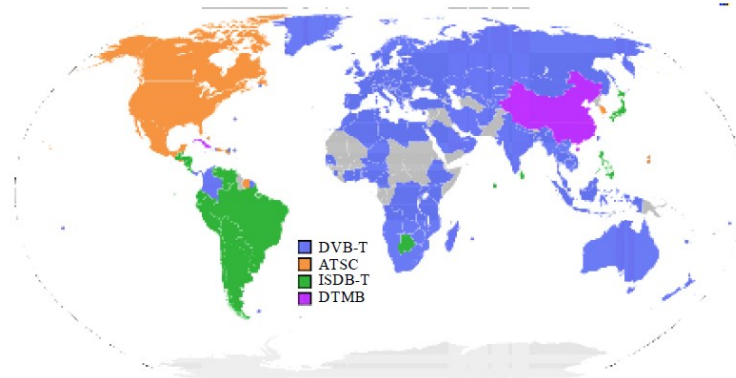
3.3 Padrões de Televisão Digital

O padrão norte-americano ATSC foi o primeiro sistema de televisão digital a entrar em operação. Ele começou a ser desenvolvido a partir de 1982 e está funcionando nos EUA desde novembro de 1998. O Projeto *Digital Video Broadcasting* (DVB) foi criado em 1993 e começou a desenvolver um sistema de transmissão terrestre por volta de 1994/1995 (ALENCAR, 2009). O DVB-T foi publicado pela primeira vez em 1997, e a primeira transmissão ocorreu no Reino Unido em 1998. Em 1994, o Japão também iniciou o desenvolvimento de um sistema de transmissão de TV digital (SONG; YANG; WANG, 2015). E em 1999, o ISDB-T foi especificado pelo *Digital Broadcasting Experts Group* (DIBEG) (ALENCAR, 2009).

Em 1998, ano em que os padrões ATSC e DVB-T entraram em operação, a Universidade Presbiteriana Mackenzie em conjunto com a Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão (SET) e a Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão (ABERT) iniciaram testes com os sistemas de TV digital ATSC e DVB-T. E no início de 2000, perto de concluir os testes, foi incluído o padrão ISDB-T. Os resultados foram fornecidos a Anatel com a finalidade de respaldar a decisão do sistema de TV digital a ser adotado pelo Governo Brasileiro (BEDICKS et al., 2006). Em 2003-2004 novos testes foram realizados e os resultados são apresentados em Bedicks et al. (2006). As análises dos testes laboratoriais de 2000 e 2004 mostraram que o sistema ISDB-T apresentou bom desempenho mesmo na presença de multipercurso severo e interferência de ruído impulsivo. Finalmente, em 29 de junho de 2006, a publicação do Decreto nº 5.820 definiu o padrão ISDB-T para o SBTVD-T.

O governo chinês começou a desenvolver um padrão de televisão digital oficialmente em 1999. O padrão DTMB só foi anunciado em 18 de agosto de 2006. Houve um período experimental de um ano antes de ser oficialmente implementado em agosto de 2007. Ele passou a ser reconhecido pela ITU no ano de 2011 (SONG; YANG; WANG, 2015). A adoção desses sistemas pelos países está distribuída de acordo com a Figura 20.

Figura 20 – Distribuição dos padrões de televisão digital no mundo



Fonte: ITU (2016)

Nesta seção serão abordados os principais padrões de televisão digital: ATSC, DVB-T e ISDB-T e DTMB.

3.3.1 *Advanced Television Systems Committee (ATSC)*

O sistema de TV digital norte-americano ATSC transmite áudio, vídeo e dados auxiliares a uma taxa de transmissão de 19 Mbit/s em um canal de 6 MHz. O sistema de TV digital norte-americano ATSC pode ser dividido em três subsistemas (SONG; YANG; WANG, 2015):

- Codificação e compressão da fonte;
- Multiplexação de serviços e transporte;
- Transmissão.

A codificação e compressão da fonte tem a função de fazer a compressão de áudio, vídeo e de dados auxiliares, visando minimizar o número de bits necessários que representam a informação. O padrão MPEG-2 é usado para codificação de vídeo, e o padrão Dolby AC-3 é usado para codificação de áudio. A multiplexação de serviços e transporte realiza a multiplexação de todos os pacotes de fluxos de dados em apenas um, utilizando o fluxo de transporte MPEG-2. O subsistema de transmissão realiza a codificação e modulação do canal. O codificador de canal recebe o fluxo de bits e adiciona informações que possibilitam o receptor reconstruir o sinal recebido. A modulação utiliza o fluxo de dados para modular uma portadora para que o sinal seja transmitido, usando modulação *Vestigial Sideband* de oito níveis (8-VSB) para a televisão terrestre (SONG; YANG; WANG, 2015). O ATSC utiliza o padrão de *middleware DTV Application Software Environment* (DASE). Esse padrão define

uma camada de software que permite que o conteúdo do programa e os aplicativos sejam executados em um receptor comum (ALENCAR, 2009).

O ATSC tem eficiência espectral superior aos outros padrões, e utiliza menos energia para atingir cobertura similar, no entanto, necessita de um ambiente adequado para recepção (CARDOSO, 2018). Em setembro de 2016, foi lançado o novo padrão ATSC 3.0. E em maio de 2017, o sistema foi adotado pela Coreia do Sul (DIONÍSIO; AKAMINE, 2017). O ATSC 3.0 foi desenvolvido visando alcançar o uso altamente eficiente do espectro, qualidade de Ultra-Alta Definição (*Ultra-High Definition – UHD*) utilizando Codificação de Vídeo de Alta Eficiência (*High Efficiency Video Coding – HEVC*) e disponibilizar, entre outros serviços, fácil integração com sistemas de banda larga e todos os transportes baseados em IP para conectividade com a internet.

O ATSC 3.0 utiliza as tecnologias de transmissão mais recentes, como códigos de Verificação de Paridade de Baixa Densidade (*Low-Density Parity-Check – LDPC*) aprimorados, modulação *Non-Uniform Quadrature Amplitude Modulation* (nuQAM), Multiplexação por Divisão de Camadas (*Layered Division Multiplexing – LDM*) e uma tecnologia de Multiplexação Não Ortogonal (*Non-Orthogonal Multiplexing – NOM*) que nunca foi implementada em sistemas de transmissão e banda larga anteriores (ZHANG et al., 2019).

3.3.2 Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)

O sistema de TV digital DVB-T usa o padrão MPEG-2 para a codificação de fontes de áudio e vídeo e multiplexação dos diferentes sinais (ALENCAR, 2009). A tecnologia de modulação de Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal Codificada (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing – COFDM*) define dois modos de operação com diferentes quantidades de subportadoras: 1705 (2K) e 6817 (8K). O modo 2K é adequado para operação de transmissor único e rede de frequência única (*Single Frequency Network – SFN*) de pequena escala com distância de transmissão limitada, enquanto o modo 8K é adequado para operação de transmissor único e SFNs de pequena e grande escala (SONG; YANG; WANG, 2015).

A técnica COFDM utiliza as várias portadoras para transportar o sinal em subcanais de multiplexação por divisão de frequência (*frequency division multiplexing – FDM*) com 6, 7 ou 8 MHz. A taxa de transmissão pode variar de 5 a 31,7 Mbit/s. A plataforma *Multimedia Home*

Platform (MHP) foi adotada para a camada de *middleware*. O MHP define uma interface genérica entre os aplicativos e o *set-top box* (hardware e sistema operacional), na qual os aplicativos são executados (ALENCAR, 2009). Este sistema pode superar com segurança a interferência causada pelo sinal de atraso, incluindo ecos refletidos pelo terreno e edifícios ou sinais transmitidos por transmissores remotos no ambiente SFN (SONG; YANG; WANG, 2015).

O *Digital Video Broadcasting – Second Generation Terrestrial* (DVB-T2) entrou em operação em 2008. Países como a França e a Alemanha optaram por substituir o sistema DVB-T pelo DVB-T2. As principais diferenças em relação à primeira geração são os códigos corretores de erros, codificação H.264/AVC, MPEG-4/AAC e novas técnicas de transmissão e eficiência (ESPERANTE; AKAMINE; BEDICKS, 2016).

3.3.3 *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial (ISDB-T)*

O sistema ISDB-T é projetado para fornecer som, vídeo e outros dados com alta qualidade para receptores fixos e móveis. O sistema foi projetado especificamente para fornecer flexibilidade, capacidade de expansão e integração para transmissão de multimídia. O padrão MPEG-2 é o responsável pela codificação e multiplexação dos fluxos de dados de áudio, vídeo e auxiliares. O sistema possui modulação de Transmissão Segmentada por Banda (*Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing – BST-OFDM*), que consiste em 13 segmentos OFDM. Cada segmento corresponde a 1/13 da largura de banda do canal usado, que pode ser de 6, 7 ou 8 MHz, dependendo da região (ITU, 2016). A *Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB) é o padrão de *middleware* adotado pelo sistema japonês (ALENCAR, 2009).

3.3.4 *Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting (DTMB)*

O sistema DTMB usado na China possui largura de banda do canal de 8 MHz, mas ele também suporta largura de banda de 6 MHz e 7 MHz, podendo ser usado em diferentes países com diferentes modos de largura de banda. Ele usa a interface MPEG-2 como formato de entrada de dados, mas é flexível e permite a utilização de outros padrões de compressão. A taxa de transmissão do padrão chinês varia de 4,813 Mbit/s a 32,486 Mbit/s (ITU, 2016).

Pela primeira vez, a transmissão digital de Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal Síncrona no Domínio do Tempo (*Time Domain Synchronous – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – TDS-OFDM*) foi introduzida em um sistema de transmissão de televisão digital. (SONG; YANG; WANG, 2015). Devido à adoção de tecnologias como o TDS-OFDM e LDPC, o sistema DTMB tem as vantagens de alta eficiência de espectro, grande cobertura, alta mobilidade e pode combater fortemente a interface de múltiplos caminhos (ITU, 2016).

Uma variante mais recente e mais eficiente do DTMB é o DTMB – *Advanced* (DTMB-A). Ela oferece maior eficiência do que o DTMB em termos de imunidade a ruído e interferência devido aos métodos avançados de correção de erros, intercalação e mapeamento de constelação. Tais aprimoramentos estendem as possibilidades do sistema até HDTV e transmissão de dados com possibilidade de funcionamento em redes de frequência única e múltipla (ITU, 2016).

3.4 Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T)

Com a publicação do Decreto nº 5.820/2006, foi adotado o sistema Sistema Brasileiro de Televisão Digital - Terrestre (SBTVD-T) baseado no sistema japonês ISDB-T com inovações tecnológicas aprovadas pelo Comitê de Desenvolvimento criado em 2003. O SBTVD-T, denominado *Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial version B* (ISDB-T_B) apresenta algumas inovações em relação à versão ISDB-T como a codificação H.264/AVC, MPEG-4/AAC e interatividade. Vários países das Américas do sul e central, continente africano e asiático adotaram o ISDB-T_B (ESPERANTE; AKAMINE; BEDICKS, 2016).

A transmissão do serviço de televisão digital terrestre é dividida em codificação de fonte, codificação de canal, modulação e transmissão. A codificação de fonte recebe os sinais de áudio e vídeo para gerar fluxos de transportes (*Transport Stream – TS*) de 188 Bytes. Os TS de áudio, vídeo e dados auxiliares são transportados pela *Asynchronous Serial Interface* (ASI) e multiplexados para gerar o *Broadcast Transport Stream* (BTS) com pacotes de 204 Bytes. O BTS é codificado no processo de codificação de canal, modulado e enviado para o sistema de transmissão que amplifica a potência e irradia o sinal via antena de transmissão em um canal de 6 MHz (BOTELHO, 2019).

O SBTVD-T utiliza o sistema de codificação de áudio MPEG-4 AAC e o H.264 para codificação de vídeo. O processo de codificação de canal inicia após a multiplexação de um ou mais TS, com pacotes de áudio, vídeo e dados. O BTS único é gerado na saída do multiplexador. O método de modulação adotado pelo SBTVD é o BST-OFDM. O sistema de transmissão amplifica a potência elevando a potência ao nível necessário, conforme a necessidade de área de cobertura. O SBTVD possui três modos de transmissão com diferentes intervalos de portadora, a fim de lidar com uma variedade de condições.

Aumentar a potência de transmissão amplia a área de cobertura e aumenta os custos com o consumo de energia e despesas operacionais, portanto a potência de transmissão deve possuir a melhor eficiência energética possível. Após a amplificação de potência, o sinal é guiado por cabos e conectores até a antena, que converte a energia recebida em campo eletromagnético (BOTELHO, 2019). O *middleware* Ginga, adotado pelo SBTVD-T, foi desenvolvido em conjunto por pesquisadores da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) (FARIAS; CARVALHO; ALENCAR, 2018).

3.5 Legislação e Normas Técnicas de Radiodifusão

A radiodifusão em geral é dividida em radiodifusão sonora (rádio) e radiodifusão de sons e imagens (televisão). Devido o espectro eletromagnético ser um recurso escasso e ter influência social por meio da geração e difusão de conteúdo, entende-se que a radiodifusão é um serviço de interesse público e por esta razão é regulada. No Brasil, a Anatel é a agência reguladora da radiodifusão, responsável pela gestão do espectro eletromagnético, canalização e gestão dos planos de canais a serem usados pelos prestadores do Serviço de Radiodifusão. A outorga dos serviços de radiodifusão compete ao Ministério das Comunicações (MC), com exceção da outorga do Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens que é atribuição da Presidência da República (CARDOSO, 2018).

A Regulamentação da Radiodifusão foi consolidada por meio da Resolução nº 721, de 11 de fevereiro de 2020, que destina faixas de radiofrequências para o Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens – TV e de Retransmissão de Televisão – RTV, para uso em caráter primário, como mostra a Tabela 2 (ANATEL, 2020b).

Tabela 2 – Faixas de radiofrequências para televisão

FAIXA	CANAL	FREQUÊNCIAS (MHz)
VHF baixo	2-4	54 MHz – 72 MHz
VHF baixo	5-6	76 MHz – 88 MHz
VHF alto	7-13	174 MHz – 216 MHz
UHF	14-36	470 MHz – 608 MHz
UHF	38-51	614 MHz – 698 MHz

Fonte: ANATEL (2020b)

Os sistemas de TV e RTV em tecnologia analógica nessas frequências passarão a operar em caráter secundário e sem direito à prorrogação, após 31 de dezembro de 2023 (ANATEL, 2020b). De acordo com a Resolução nº 583/2012, a canalização para TV digital é viabilizada na faixa alta de VHF e na faixa de UHF (ANATEL, 2012).

A Portaria nº 276/2010 classifica as estações digitais em Classe Especial, A, B e C. Ela indica, para as faixas de VHF e UHF, os valores máximos de ERP, altura do centro de irradiação da antena transmissora em relação ao nível médio do terreno (HNMT) e as respectivas distâncias máximas ao contorno de serviço, para cada classe de estação (MC, 2010)

A televisão terrestre fornece conteúdo audiovisual de forma livre, aberta e gratuita. Sua cobertura é determinada pela área ao redor da estação transmissora de onde é possível receber os sinais com qualidade, ou seja, quando o valor de intensidade de campo elétrico, em dB μ V/m, é aceitável. A área de cobertura pode ser expandida através do Serviço de Retransmissão de Televisão (CARDOSO, 2018).

As estações geradoras transmitem conteúdo audiovisual que foi desenvolvido em seus próprios estúdios. Enquanto as estações retransmissoras captam os sinais de sons e imagens da estação geradora para a retransmissão (BOTELHO, 2019). A estação digital deve ser instalada de forma a atender, no mínimo, 90% da área do município objeto do ato de outorga, obedecendo às características previstas para o canal (MC, 2010)

A viabilidade técnica de um canal depende dele não interferir e não sofrer interferências de nenhum outro canal do plano básico. O conceito de proteção está relacionado à garantia da não sobreposição do contorno interferente no contorno protegido (CARDOSO, 2018). A área de prestação do serviço de uma estação geradora ou retransmissora de televisão corresponde à área delimitada pelo contorno de intensidade de campo elétrico de 43 dB μ V/m para VHF e 51 dB μ V/m para UHF. A Resolução nº 398/2005 adotou a Recomendação UIT-R P.1546, abordada no capítulo anterior, que fornece os

procedimentos para cálculo de viabilidade envolvendo canais de TV Digital (ANATEL, 2005).

De acordo com Portaria nº 925/2014, os sinais emitidos pelas estações de TV e RTV devem estar de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) referentes ao padrão do SBTVD-T (MC, 2014). As normas ABNT NBR 15601 a 15608 e 15610 estabelecem as características técnicas do sistema de transmissão e recepção, incluindo codificação, multiplexação, segurança, canal de interatividade, guia de operação e acessibilidade do SBTVD-T (CARDOSO, 2018). A ABNT NBR 15604:2020 (Televisão digital terrestre – Receptores) estabelece a mínima potência do sinal de recepção em -77 dBm. No entanto, considera-se esse valor muito rígido. Por isso, o valor desejável pode ser determinado obedecendo ao critério em que a recepção é possível com intensidade de campo elétrico de $60 \text{ dB}\mu\text{V/m}$, compreendido na área de serviço (ABNT, 2020).

4 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Para analisar o desempenho de um sistema de televisão digital é necessário realizar medições da intensidade do sinal em sua área de cobertura. Os dados coletados em pesquisas de campo são normalmente de fontes pontuais. No entanto, são necessários dados espaciais contínuos sobre a região de interesse para auxiliar na tomada de decisões confiáveis. Dessa forma, os valores de um atributo em pontos não amostrados precisam ser estimados quando os dados coletados não cobrem completamente a área de interesse (LI; HEAP, 2008).

Segundo Yamamoto e Landim (2013), a reprodução das características do fenômeno espacial baseado em pontos amostrais é denominada interpolação ou estimativa. A interpolação de pontos não amostrados é feita por meio de ajuste de funções matemáticas locais ou globais. Funções matemáticas locais utilizam os pontos amostrais mais próximos ao ponto não amostrado, enquanto as globais utilizam todos os pontos amostrais. De acordo com Mitas e Mitasova (2005), há diversos métodos de interpolação e cada um produz uma representação espacial dos dados diferente. Por isso, é importante ter conhecimento aprofundado do fenômeno de estudo para avaliar qual dos métodos representa melhor a realidade. O uso de um método inadequado pode resultar em um modelo de distribuição espacial distorcido, levando a conclusões erradas sobre o fenômeno.

Os métodos de interpolação podem ser divididos em: modelos determinísticos e modelos estocásticos. Os modelos determinísticos têm por base critérios puramente geométricos em que as distâncias são euclidianas e não fornecem medidas de incerteza. Os modelos estocásticos interpretam os dados coletados como provenientes de processos aleatórios e são capazes de quantificar a incerteza associada ao estimador. Os modelos geoestatísticos pertencem a essa categoria (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A análise espacial dos dados é realizada através da comparação dos diversos métodos. O melhor método é aquele que gera resultados confiáveis, rápidos e satisfatórios ao usuário (LANDIM; MONTEIRO; CORSI, 2002).

Há vários estudos que analisam métodos de interpolação espaciais para diferentes campos, como precipitação, temperatura do ar, poluição do ar, campos eletromagnéticos, entre outros (GUMUS; SEN, 2013). Sen et al. (2008) descrevem a interpolação espacial de medições de campo eletromagnético e comparam a precisão das Redes Neurais Artificiais (RNA) e da Krigagem geoestatística. Azpurua e Ramos (2010) analisam três métodos de

interpolação com o objetivo de estimar a magnitude média do campo eletromagnético. A seguir, serão apresentados alguns dos métodos de interpolação que mais se destacam.

4.1 Métodos Determinísticos

A principal característica que difere os métodos de interpolação determinísticos dos estocásticos/geoestatísticos é a avaliação do erro. Enquanto os métodos estocásticos fornecem uma avaliação dos erros associados aos valores previstos, os determinísticos não o consideram (LI; HEAP, 2008). Os métodos de interpolação determinísticos dependem apenas da distribuição geométrica, não levando em consideração a correlação dentro dos dados. Eles podem apresentar resultados bons em termos de distribuição de peso geométrico, mas o processo de interpolação não analisa a relação espacial real dos valores coletados. Por esse e outros motivos se recorre, em muitos casos, aos métodos geoestatísticos (CORREIA, 2010; GRAAF, 2016). A utilização de um método determinístico é preferível nos casos em que as suposições do método geoestatístico não são válidas (GRAAF, 2016). Serão abordados os seguintes métodos determinísticos: Inverso Ponderado da Distância, Método de Shepard Modificado, Curvatura Mínima e Função de Base Radial.

4.1.1 Inverso Ponderado da Distância

O Inverso Ponderado da Distância (*Inverse Distance Weighting* – IDW) considera que os valores medidos mais próximos do local de previsão terão mais influência no valor previsto do que aqueles mais distantes. Dessa forma, cada ponto medido tem uma influência local que diminui com a distância (LUO; TAYLOR; PARKER, 2008).

De acordo com Azpurua e Ramos (2010), o método de Shepard é a forma mais simples de interpolação IDW, calculada através da Equação 60.

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=0}^n h_j^{-p}} \quad (60)$$

Onde p é o parâmetro de potência e h_j é a distância dos pontos amostrados ao ponto de interpolação dado por,

$$h_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \quad (61)$$

sendo (x, y) as coordenadas do ponto de interpolação e (x_i, y_i) as coordenadas dos pontos amostrados. Segundo Li, Heap (2008) e Santana (2018), a escolha do parâmetro de potência e do tamanho da vizinhança é arbitrária, normalmente atribui-se o valor $p = 2$. Quanto maior o valor de p , maior a influência dos valores próximos ao valor estimado.

Essa interpolação funciona melhor com pontos uniformemente distribuídos. Agrupamentos de dados distribuídos de forma irregular resultam em erros introduzidos. A vantagem do IDW é que ele é intuitivo e eficiente (AZPURUA; RAMOS, 2010). Este é um dos métodos mais simples e disponíveis. Embora ele seja fácil de implementar e esteja disponível em quase todos os sistemas de informação geográfica (*Geographic Information System – GIS*), algumas deficiências limitam aplicações práticas. Por exemplo, o método muitas vezes não reproduz a forma local implícita nos dados e produz extremos locais nos pontos de amostras (MITAS; MITASOVA, 2005).

4.1.2 Método de Shepard Modificado

O método de Shepard modificado (*Modified Shepard's Method – MSM*) é considerado uma versão melhorada do IDW. Ele utiliza o método de mínimos quadrados para eliminar o efeito de mira presente no IDW e tem a função de peso do IDW modificada para que funcione apenas no âmbito local (LIU et al., 2010). O efeito mira ou “*Bull's eye*” são áreas ao redor dos pontos amostrados, incoerentes com os contornos estimados, geralmente na forma circular concêntrica (FIGUEIREDO, 2019).

De acordo com Silva (2015), a fórmula do método Shepard modificado é dada por,

$$F(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N Q_k(x, y) W_k(x, y)}{\sum_{k=1}^N W_k(x, y)} \quad (62)$$

onde $F(x, y)$ é o valor a ser interpolado para a coordenada (x, y) , $Q_k(x, y)$ é uma função nodal e $W_k(x, y)$ é a função peso modificada.

As funções nodais são calculadas usando o método dos mínimos quadrados, com base apenas nos dados amostrados dentro do raio R_q , onde R_q denota o raio de influência dos pontos amostrado nas funções nodais. A Equação 62 define que cada ponto do *grid* é calculado com base nas funções nodais para os pontos de amostra dentro de um círculo de raio R_w , onde R_w denota o raio de influência das funções nodais no interpolante (GUMUS; SEN, 2013).

4.1.3 Curvatura Mínima

De acordo com Azpurua e Ramos (2010), o método da curvatura mínima ou *spline* utiliza uma função matemática para suavizar a curvatura total da superfície, resultando em uma superfície de curvatura mínima que passa exatamente pelos pontos amostrados.

A *spline* consiste em um polinômio de grau p sendo local em vez de global e pode ser denominada linear ($p = 1$), quadrática ($p = 2$) ou cúbica ($p = 3$). Normalmente, as *splines* são de grau 3, chamadas de *splines* cúbicas (LI; HEAP, 2008). Este método pode gerar superfícies suficientemente precisas a partir de apenas alguns pontos amostrados. E opera melhor para superfícies com baixa variação (AZPURUA; RAMOS, 2010). No entanto, pode não ser o melhor método de interpolação para grandes variações nos valores dos parâmetros em distâncias horizontais relativamente curtas (RUFO et al., 2018).

Segundo Rufo et al. (2018), há duas opções de interpolação de *spline*: regularizada ou tensão. O método regularizado permite controlar a suavidade da superfície através dos parâmetros peso e número de pontos. E o método da tensão ajusta uma superfície a um conjunto de pontos. E a elasticidade dessa superfície também pode ser controlada pelos mesmos parâmetros da opção regularizada, peso e quantidade de pontos. O peso permite ajustar a suavidade da superfície, minimizando sua curvatura e o número de pontos controla o número médio de pontos contidos em cada região usada no cálculo da superfície.

4.1.4 Função de Base Radial

Segundo Liu et al. (2010), os métodos de função de base radial são métodos de interpolação global para pontos dispersos, que consistem na combinação de múltiplas interpolações. Este método utiliza a distância entre os pontos de interpolação e os pontos discretos como uma única função variável e como a função de base. E introduz um coeficiente de suavização, que melhora a precisão da interpolação, mas também aumenta a quantidade de

dados. A função de interpolação para o método da função de base radial é mostrada na Equação 63.

$$Z_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(h_i) \quad (63)$$

Onde Z_j é o valor desconhecido, λ_i é a derivada do peso, $B(h_i)$ é a função de base e h_i é a distância entre os pontos de interpolação até o ponto i . A função de base é usada para determinar o valor do peso. A Tabela 3 apresenta cinco tipos principais de função de base.

Tabela 3 – Tipos de função de base radial

FUNÇÃO DE BASE RADIAL	EQUAÇÃO
<i>Multiquadric</i>	$B(h_i) = \sqrt{(h_i^2 + R^2)}$
<i>Inverse Multiquadric</i>	$B(h_i) = 1/\sqrt{(h_i^2 + R^2)}$
<i>Multilog</i>	$B(h_i) = \log(h_i^2 + R^2)$
<i>Natural Cubic Spline</i>	$B(h_i) = (h_i^2 + R^2)^{3/2}$
<i>Thin Plate Spline</i>	$B(h_i) = (h_i^2 + R^2)\log(h_i^2 + R^2)$

Fonte: GUMUS e SEN (2013)

A variável R na função de base radial representa o fator de suavização. De acordo com Gumus e Sen (2013), neste método, o sistema de equações lineares é resolvido apenas uma vez, o que é uma vantagem. Por outro lado, quanto maior o número de pontos, maior o número de equações lineares, o que significa um longo tempo computacional e propagação de erros de arredondamento.

4.2 Métodos Geoestatísticos

A geoestatística busca caracterizar uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, considerando as incertezas associadas. O ponto de partida para um estudo geoestatístico é obter um conjunto de observações, que constituem uma amostra. E por meio do ajuste de funções matemáticas é possível interpolar ou estimar um ponto não amostrado (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A estatística clássica assume que os pontos de observação são independentes, enquanto que a geoestatística requer a correlação e dependência espacial. A correlação espacial, entre o valor de uma variável em um local conhecido e o valor da mesma variável localizada em sua vizinhança, é avaliada por meio de um modelo probabilístico que se baseia na aleatoriedade dos dados (OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2015).

A coleta de dados da amostragem pode ser realizada de forma aleatória simples, aleatória estratificada ou sistemática. Na amostragem aleatória simples, os pontos são escolhidos casualmente dentro de uma determinada região. A amostragem aleatória estratificada consiste em subdividir a região de estudo em células de dimensões iguais e escolher os pontos aleatoriamente dentro de cada célula. Por fim, a amostragem sistemática define pontos espaçados igualmente dentro de uma região subdividida de forma regular. A amostragem sistemática é a que oferece o melhor resultado. No entanto, sua aplicação nem sempre é possível devido às obstruções do meio, o que resulta em uma distribuição semirregular. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

De acordo com Oliveira, Grego e Brandão (2015), um método geoestatístico é dividido em duas etapas: a análise variográfica e estimação dos valores desconhecidos. A análise variográfica analisa a dependência espacial dos dados. E a estimação dos valores desconhecidos, segundo Li e Heap (2008), é realizada por um dentre os vários algoritmos de krigagem. A krigagem contempla uma família de algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados. As duas etapas serão descritas com mais detalhes nesta seção.

4.2.1 Variograma

Os valores das medições podem variar entre si dentro de uma dada distância. Espera-se que pontos separados por distâncias menores do que um determinado alcance sejam espacialmente correlacionados e pares de pontos mais distantes do que este alcance não apresentem dependência espacial. O variograma consiste em uma representação gráfica da variância versus a distância que revela a dependência espacial dos dados. A existência da dependência espacial supõe que dados da vizinhança são mais parecidos do que dados distantes (OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2015).

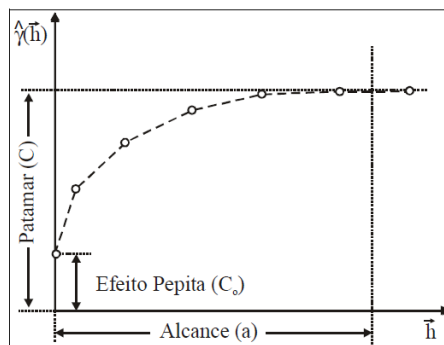
A análise variográfica consiste em duas etapas. A primeira etapa é o cálculo do semivariograma experimental usando um conjunto de dados com distância limitada. Em seguida, uma função matemática deve ser ajustada por meio do semivariograma experimental

para descrever a variabilidade espacial como uma função contínua (GRAAF, 2016). De acordo com Oliveira, Grego e Brandão (2015), o semivariograma experimental $\gamma(h)$ pode ser através da Equação 64.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (64)$$

Onde $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por um vetor h . Segundo Graaf (2016), o cálculo do semivariograma fornece um conjunto de valores de variância discretos. Para obter uma descrição contínua da variância com a distância, uma função matemática deve ser ajustada ao semivariograma. O variograma é a função adequada ao semivariograma experimental. Há três parâmetros de ajuste do variograma, mostrados na Figura 21: alcance a , patamar C e efeito pepita C_0 .

Figura 21 – Parâmetros do variograma

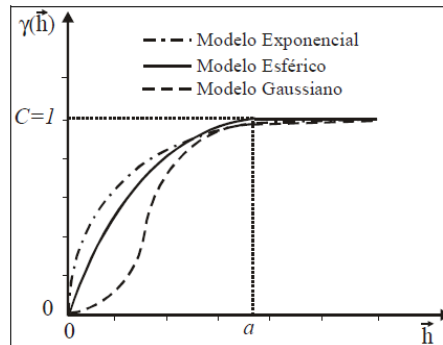


Fonte: CAMARGO, FUCKS e CÂMARA (2004)

A distância que limita a correlação espacial entre os dados amostrados é chamada de alcance a . O patamar C corresponde ao nível de variabilidade máxima entre os dados, quando o variograma se estabiliza. A partir deste ponto, considera-se que não há mais dependência espacial entre os dados amostrados. O efeito pepita C_0 é o valor do semivariograma para a distância zero. Idealmente $\gamma(0) = 0$, no entanto, à medida que h tende a zero, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado de efeito pepita, uma descontinuidade na origem do variograma que corresponde à diferença entre as amostras de maior proximidade. A descontinuidade também é causada por erros de medição e variações espaciais reais em pequenas distâncias de separação (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2004; GRAAF, 2016; OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2015).

Três modelos básicos de variograma, Figura 22, são usados com mais frequência: modelo exponencial, modelo esférico e modelo gaussiano.

Figura 22 – Modelos básicos de variograma



Fonte: CAMARGO, FUCKS e CÂMARA (2004)

O modelo esférico nivela-se completamente no patamar na distância a , o alcance real. Os modelos exponencial e gaussiano atingem seu patamar assintoticamente, e o alcance prático a é definido como a distância na qual a função atinge 95% do patamar (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2004; GRAAF, 2016).

4.2.2 Krigagem

Após a análise variográfica verificar a existência de dependência espacial entre os dados amostrados é possível estimar valores em locais não amostrados por meio de técnicas geoestatísticas. A krigagem é um método estocástico que usa uma combinação linear de pesos em pontos conhecidos para estimar o valor em um ponto desconhecido levando em consideração a correlação espacial por meio do variograma (RUFO et al., 2018). O termo krigagem é derivado do nome de Daniel G. Krige, que introduziu o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática das reservas no campo da mineração (LAM, 1983).

Segundo Yamamoto e Landim (2013), a krigagem abrange uma família de algoritmos conhecidos, como krigagem simples, krigagem da média, krigagem ordinária, krigagem universal, entre outros. Na prática, a krigagem ordinária é o estimador mais utilizado, devido sua simplicidade e resultados proporcionados. A krigagem ordinária é um método de estimativa local, portanto, a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima. As estimativas para pontos desconhecidos por krigagem ordinária podem ser calculadas através da Equação 65.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (65)$$

Onde $Z^*(x_0)$ é o valor estimado, λ_i são os pesos associados aos dados amostrados e $Z(x_i)$ é o valor conhecido. De acordo com Oliveira, Grego e Brandão (2015), a krigagem permite o cálculo do erro associado às estimativas, chamado de variância de estimação. Isso o diferencia e o torna superior aos demais métodos de estimação.

4.3 Validação Cruzada

Os métodos de interpolação espacial possuem um determinado grau de erro associado à estimativa. A validação cruzada consiste em um processo que determina a precisão dos valores estimados em locais onde não houve medição. Neste processo, um dado amostrado é removido e seu valor é estimado usando o restante dos dados, isso se repete para cada dado de amostra (CHAUDHARI et al., 2018). A diferença entre os valores reais e os valores interpolados é usada para determinar o erro (GRAAF, 2016).

As medições de erro mais usadas incluem: erro médio (*Mean Error* – ME), erro médio absoluto (*Mean Absolute Error* – MAE), erro quadrático médio (*Mean Squared Error* – MSE) e raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Squared Error* – RMSE), calculadas a partir das Equações 66 a 69.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{z}(s_i) - z(s_i) \quad (66)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{z}(s_i) - z(s_i)| \quad (67)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{z}(s_i) - z(s_i)]^2 \quad (68)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{z}(s_i) - z(s_i)]^2} \quad (69)$$

Onde $\hat{z}(s_i)$ é o valor previsto, $z(s_i)$ é o valor medido e N é o número de amostras. As medidas de erro auxiliam na escolha do método de interpolação mais eficiente para um

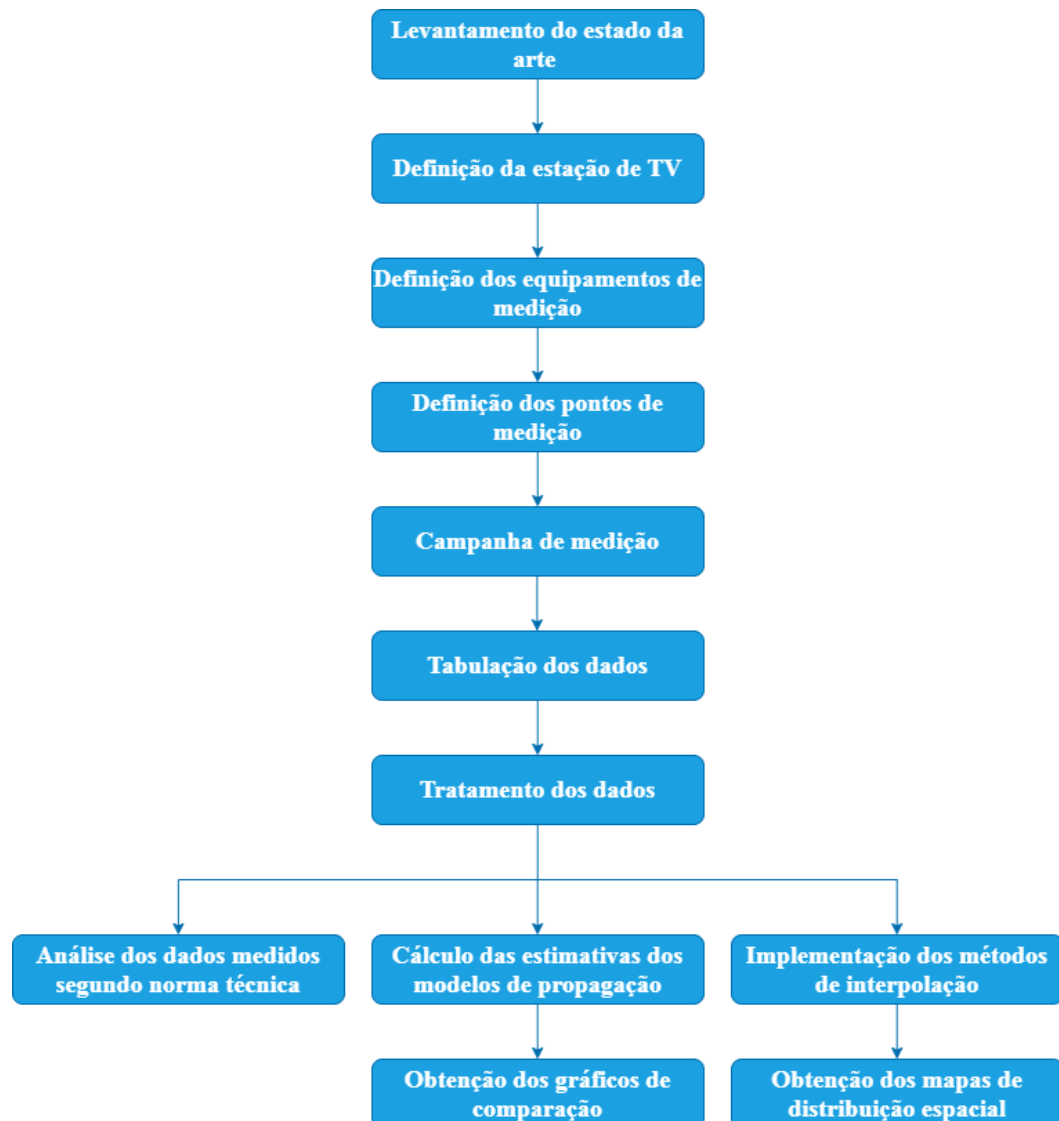
determinado conjunto de dados. Quanto menor o valor do erro, maior a precisão de estimativa do método de interpolação (SANTANA et al., 2017).

As medidas MAE e RMSE são consideradas as melhores na avaliação do desempenho dos modelos de interpolação, pois resumem a diferença média nas unidades de valores observados e previstos (LI; HEAP, 2008).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O sinal analógico do sistema de televisão aberta foi completamente desligado no dia 9 de janeiro de 2019 na cidade de Mossoró – RN, passando a ser exclusivamente sinal digital (SEJA DIGITAL, 2019). Foi escolhida uma estação Geradora de Radiodifusão de Sons e Imagens – Digital de finalidade comercial, visando analisar a propagação do sinal digital de TV na região urbana de Mossoró. Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para a realização deste trabalho. Na Figura 23 é mostrado o fluxograma com a sequência de etapas da pesquisa.

Figura 23 – Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Autoria própria (2021)

Inicialmente, foi feito o levantamento do estado da arte. Em seguida foram definidos: a estação de TV para análise da propagação do sinal digital, os equipamentos para medição e registro da potência recebida do sinal e os pontos de medição. Após a determinação dos locais, deu-se início a campanha de medição. As etapas seguintes foram tabulação e tratamento dos dados coletados em campo. O tratamento dos dados permitiu a análise do nível de potência recebida segundo norma técnica, comparação das estimativas feita por modelos de propagação com os dados reais de potência e a distribuição espacial da potência do sinal digital na área urbana da cidade de Mossoró-RN. A seguir estas etapas são descritas em detalhes.

5.1 Descrição da Estação de TV

Através do Sistema Mosaico, criado pela Anatel, é possível ter acesso à base de dados dos planos básicos dos serviços de radiodifusão (TV, RTV, TVD, FM e OM). Acessando o Módulo de Pesquisa de Canais do Sistema Mosaico, são disponibilizados os relatórios dos canais com suas principais informações. A estação de TV escolhida ocupa o canal 47 no espectro eletromagnético, possui largura de banda de 6 MHz (668 MHz – 674 MHz), frequência central 671 MHz e está localizada nas coordenadas 5° 12' 26.0" S, 37° 19' 32.0" W, Figura 24.

Figura 24 – Estação transmissora de TV digital (canal 47) em Mossoró - RN



Fonte: GOOGLE (2020)

O sistema de transmissão é composto por um transmissor com potência de operação de 0,3 kW. As informações referentes à linha e antena de transmissão, são especificadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Especificações técnicas da linha de transmissão

FABRICANTE	Commscope
MODELO	AVA7-50
COMPRIMENTO	62 m
ATENUAÇÃO	1,796 dB/100 m
PERDAS ACESSÓRIAS	0,25 dB
IMPEDÂNCIA	50 Ω

Fonte: ANATEL (2020a)

Tabela 5 – Especificações técnicas da antena de transmissão

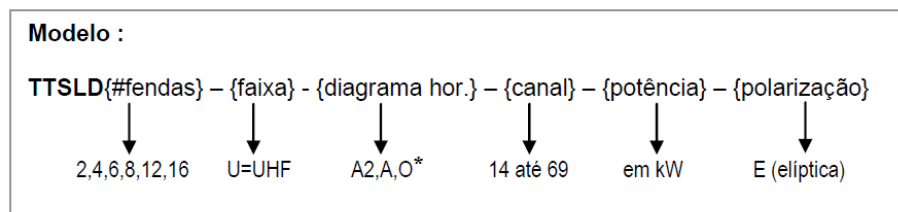
FABRICANTE	Transtel Conti & Cia Ltda
MODELO	TTSLD2-U-O-47-1-E
GANHO	4,24 dBd
POLARIZAÇÃO	Elíptica
HCI*	52,01 m
ERP MÁXIMO	0,58 kW

* Altura do Centro de Fase do Sistema Irradiante

Fonte: ANATEL (2020a)

As características da antena modelo TTSLD2-U-O-47-1-E da Trans-Tel[®] Conti & Cia Ltda são especificadas conforme é mostrado na Figura 25 e o diagrama de radiação da antena de transmissão é mostrado na Figura 26.

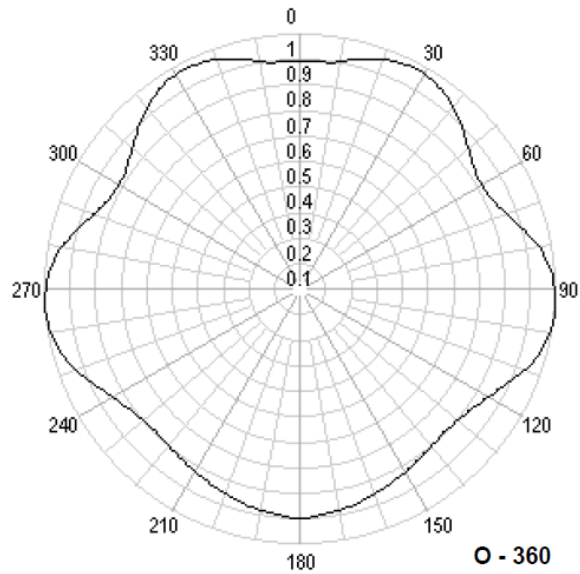
Figura 25 – Modelo da antena transmissora



*A2 – 200 graus; A – 220 graus; O – Omnidirecional.

Fonte: TRANSTEL (2009)

Figura 26 – Diagrama de radiação no plano horizontal da antena transmissora



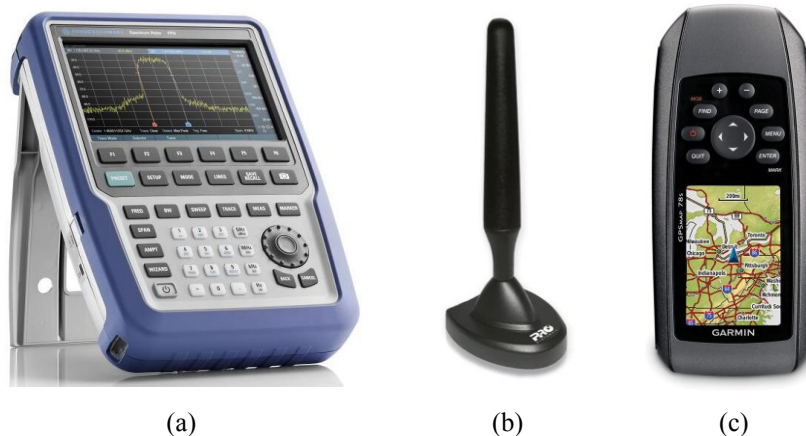
Fonte: TRANSTEL (2009)

O termo TTSLD identifica a antena como sendo transmissora de *slot* digital. Em seguida o modelo informa que há duas fendas, a faixa de frequências é UHF, possui diagrama horizontal omnidirecional, canal 47, potência de 1 kW e polarização elíptica.

5.2 Equipamentos de medição

Para medir a potência do sinal digital de TV foi utilizado um sistema de medição composto por uma antena de recepção digital acoplada ao analisador de espectro e um *Global Positioning System* (GPS), Figura 27.

Figura 27 – Equipamentos do sistema de medição: (a) analisador de espectro; (b) antena de recepção; (c) GPS



Fonte: Autor (2021)

O analisador de espectro tem a função de medir e registrar a potência do sinal em dBm. O Spectrum Rider FPH Model .06 da Rohde & Schwarz, mostrado na Figura 27(a), opera na faixa de frequência de 5 kHz – 6 GHz. O modelo da antena de recepção digital é PROHD-2400 da Proeletronic, mostrada na Figura 27(b). Dentre os diversos tipos de antenas, a antena monopolo facilita o trabalho de medição por ser omnidirecional, descartando a necessidade de ser direcionada para a antena de transmissão. A antena de recepção possui ganho de 4 dBi e opera nas faixas VHF (174 MHz – 216 MHz) e UHF (470 MHz – 806 MHz). A antena foi posicionada sobre um mastro de 3 m e conectada ao analisador de espectro para medir a potência do sinal. E o GPSMAP 78S da Garmin®, mostrado na Figura 27(c), foi usado para registrar as coordenadas geográficas dos locais onde ocorreram as medições.

Para realizar a medição, foi necessário configurar alguns parâmetros no analisador de espectro. O Ato nº 942 de 08 de Fevereiro de 2018 da Anatel, que aprova os requisitos técnicos para avaliação da conformidade de transmissores e retransmissores para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre, define requisitos relacionados à potência de saída. A Tabela 6 especifica os valores dos parâmetros que devem ser configurados no analisador de espectro (ANATEL, 2018).

Tabela 6 – Configuração do analisador de espectro

Frequência Central	Span	RBW	VBW	Modo de Detecção	BW do Canal
Frequência central das portadoras OFDM do canal	10 MHz	30 kHz	300 kHz	Sample	5,7 MHz

Fonte: ANATEL (2018)

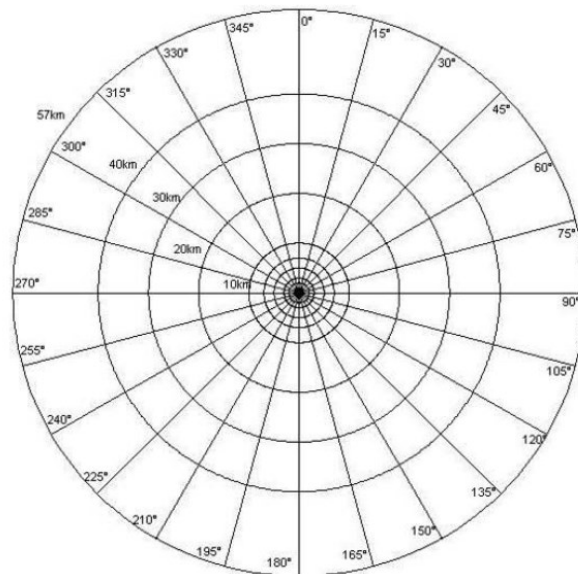
A potência do sinal digital de TV é uniformemente distribuída através do canal de transmissão. Portanto, a medição deve levar em consideração a largura de faixa total do sinal modulado. Tratando-se de sinais digitais, o valor da potência média é o mais apropriado para o tipo de modulação utilizada (ANATEL, 2018).

5.3 Definição dos pontos de Medição

De acordo com a metodologia desenvolvida pelo laboratório de TV digital da Universidade Presbiteriana Mackenzie, os pontos de medição são definidos traçando 24 radiais com origem na torre de transmissão e espaçadas em um ângulo de 15° e 10 círculos concêntricos de raios de 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 40 e 57 km, podendo variar de acordo com o

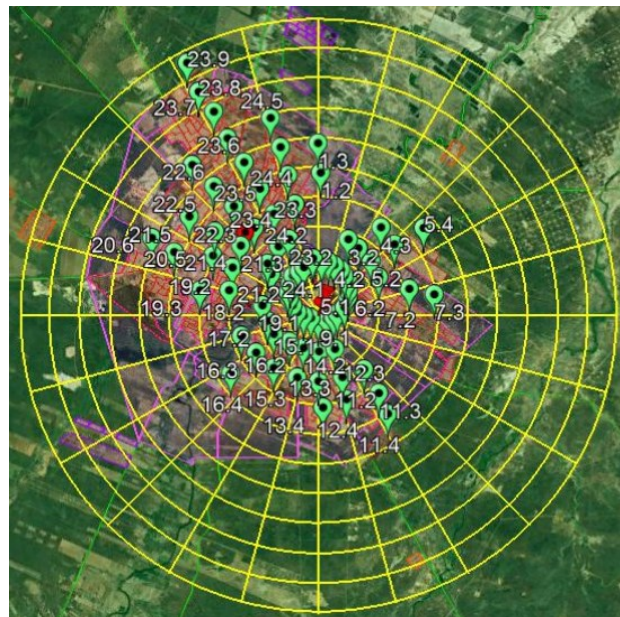
contorno protegido do canal. A interseção entre as radiais e os círculos concêntricos determina as coordenadas de cada ponto, estabelecendo um conjunto de 240 pontos de medição, como é mostrado na Figura 28 (MOTOYAMA, 2010). Adaptando esta metodologia, foram traçadas 24 radiais e 10 círculos concêntricos de raios 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 km, que estão dentro da área de cobertura do sistema de transmissão que foi analisado, Figura 29.

Figura 28 – Distribuição dos pontos de medição



Fonte: MOTOYAMA (2010)

Figura 29 – Pontos de medição na área urbana de Mossoró – RN



Fonte: Autor (2021)

O objetivo é medir a potência do sinal na área urbana da cidade, onde há maior concentração de obstáculos e aglomerações, portanto, apenas os pontos de interseção entre radial e círculo dentro da área urbana foram considerados. O site do IBGE disponibiliza a malha de setores censitários das cidades de cada estado, possibilitando identificar a área urbana da cidade de Mossoró (IBGE, 2020).

Dentro da área urbana as coordenadas de alguns pontos levavam a locais inacessíveis ou de acesso inviável, quando não foi possível realizar a medição em local mais próximo, o ponto foi removido das medições. Dessa forma, chegou-se a um total de 82 pontos de medição. A metodologia adotada busca representar a perda do sinal com a distância, tornando-a eficaz na avaliação da propagação do sinal digital de um sistema de TV.

5.4 Campanha de medição

A campanha de medição foi realizada nos dias 1 e 2 do mês de junho de 2021, nos períodos manhã e tarde. Dos pontos amostrados, apenas aqueles em que foi possível realizar o deslocamento de carro foram selecionados para medição. No processo de medição a antena de recepção foi posicionada em um mastro de 3 metros de altura e conectada ao analisador de espectro para medir e registrar a potência do sinal digital em dBm, conforme Figura 30. As coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada ponto onde foi realizada a medição da potência do sinal digital foram registradas no GPS.

Figura 30 – Sistema de medição da potência recebida do sinal digital de TV



Fonte: Autor (2021)

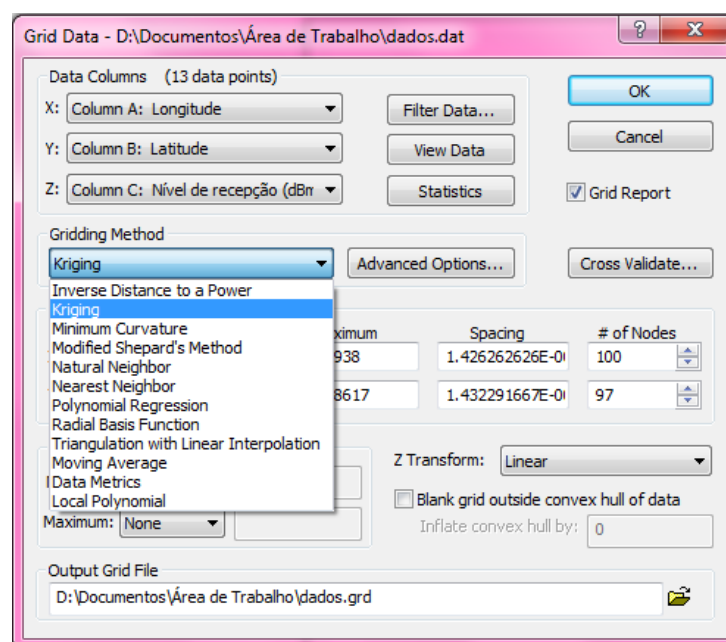
5.5 Tratamento dos Dados

Após a campanha de medição foi realizada a tabulação dos dados, onde os valores de potência e respectivas coordenadas geográficas foram organizados em uma planilha no Microsoft Excel. Dessa forma, foi possível analisar o nível de potência recebida do sinal digital na área urbana de Mossoró segundo a ABNT NBR 15604: Televisão digital terrestre – Receptores, que estabelece o limiar de recepção em $-77,40$ dBm.

Utilizando o Excel, foram calculadas as estimativas de potência recebida de acordo com os modelos de propagação do Espaço Livre, Hata e Recomendação ITU-R P. 1546-6, descritos no Capítulo 2. Os modelos de propagação foram avaliados através das métricas MAE e RMSE, calculadas na mesma plataforma. Os valores de potência medidos e estimados foram comparados por meio de gráficos gerados no *Software Origin*.

O *software Surfer*[®] 13 foi utilizado para gerar os mapas de distribuição espacial (mapas de contorno) da potência do sinal digital na área urbana de Mossoró-RN. O *Surfer*[®] é um pacote de programas comerciais desenvolvidos pela *Golgen Software* que possibilita a geração de mapas de variáveis a partir de dados espacialmente distribuídos (LANDIM; MONTEIRO; CORSI, 2002). Para isso, é disponibilizado um amplo conjunto de métodos de interpolação espacial, que fornece diferentes interpretações dos dados. A Figura 31 mostra os métodos de interpolação disponíveis na versão *Surfer*[®] 13.

Figura 31 – Janela para definir o método de interpolação para a grade de dados



O mapa de contorno consiste em uma representação bidimensional de dados tridimensionais. As primeiras duas dimensões são as coordenadas X e Y e os contornos definem linhas de valores Z, que irão corresponder à potência do sinal ao longo das extensões do mapa. A forma da superfície é mostrada pelas linhas de contorno. Esse tipo de mapa é usado para uma variedade de aplicações, o valor Z pode ser temperatura, concentração, frequência ou qualquer outra coluna numérica de dados.

O *Surfer*[®] também disponibiliza o relatório de validação cruzada para cada processo de interpolação, onde são mostrados os valores de erro ME e RMSE associados ao método. Esses valores foram usados como métricas de avaliação para identificar o método de interpolação mais adequado na representação da distribuição do sinal digital em Mossoró.

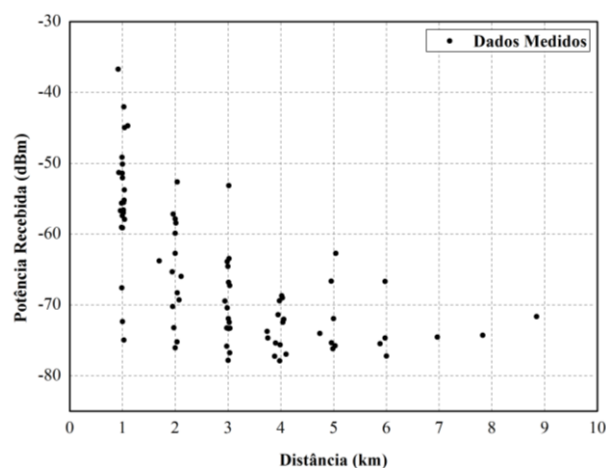
6 RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se a análise do conjunto de dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV do canal 47 da cidade de Mossoró – RN. Inicialmente, os dados são confrontados com o limiar de recepção estabelecido pela ABNT NBR 15604: Televisão digital terrestre – Receptores. A segunda análise é uma comparação dos valores medidos com os valores estimados pelos modelos de propagação descritos no Capítulo 2 que são adequados ao tipo de sinal. Os modelos de propagação são avaliados por meio do erro que apresentam. Na terceira e última análise são utilizados os métodos de interpolação descritos no Capítulo 4 para criar mapas de contorno do sinal digital de TV na região urbana de Mossoró. A precisão desses métodos é determinada pelo processo de validação cruzada.

6.1 Limiar de Recepção

A ABNT NBR 15604:2020 (Televisão digital terrestre – Receptores) estabelece o limiar de recepção em $-77,40$ dBm. Os níveis de potência recebida do sinal digital de TV obtidos nas medições em campo são mostrados na Figura 32, em função da distância de separação entre a antena transmissora e receptora.

Figura 32 – Dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV em função da distância na área urbana da cidade de Mossoró-RN



Fonte: Autor (2021)

Nos 82 pontos medidos, os valores da potência recebida variaram de $-36,72$ a $-77,90$ dBm. Apesar de alguns dos valores medidos se concentrarem próximo ao limiar de recepção,

apenas em dois pontos a potência recebida foi menor que o valor estabelecido em norma, Tabela 7.

Tabela 7 – Pontos em que a potência recebida do sinal digital ultrapassou o limiar de recepção

PONTO*	LATITUDE	LONGITUDE	DISTÂNCIA (km)	POTÊNCIA RECEBIDA (dBm)
11.4	-5,23828	-37,30738	3,982	-77,90
15.3	-5,23062	-37,33920	3,006	-77,83

Fonte: Autor (2021)

Os locais com as menores potências recebidas estão a uma distância da antena de transmissão de aproximadamente 3 e 4 km. Através do gráfico mostrado na Figura 32, percebe-se que locais mais distantes da antena transmissora tiveram valores maiores de potência do que os registrados nestes pontos. Isso indica que, não a distância, mas fatores externos específicos da localidade influenciaram numa maior atenuação do sinal nos pontos descritos na Tabela 7.

6.2 Modelos de Propagação

Foram utilizados os modelos de propagação do Espaço Livre, Hata e a Recomendação ITU-R P. 1546-6 para estimar a perda no caminho e então calcular a potência recebida do sinal digital. Nesta seção são apresentados os gráficos que comparam os dados obtidos nas medições com cada modelo de propagação. A avaliação de cada modelo é realizada através do erro médio absoluto (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), Equações 67 e 69, respectivamente. Tanto o RMSE quanto o MAE representam o desvio médio entre os valores estimados e medidos. No entanto, o RMSE eleva essa diferença ao quadrado, dando um peso maior a grandes desvios, enquanto o MAE dá um peso igual a todos os desvios. Em ambos os casos, quanto menor o valor do erro, melhor a estimativa.

6.2.1 Modelo de Propagação do Espaço Livre

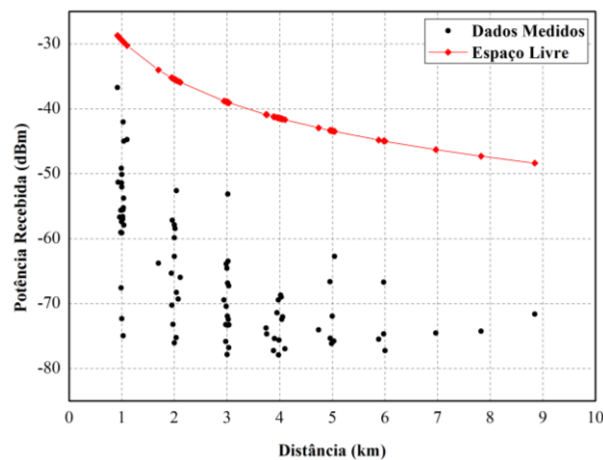
Como descrito anteriormente, o modelo de propagação do Espaço Livre considera que há linha de visão direta entre as antenas transmissora e receptora, portanto, o cálculo inclui perdas não relacionadas à propagação e a perda do espaço livre. Na prática, durante o percurso do transmissor ao receptor há obstáculos que influenciam na propagação e atenuam o

sinal. Esse modelo foi utilizado com o objetivo de comparar as estimativas com outros modelos que consideram a perda de propagação no caminho com obstáculos.

De acordo com o relatório do canal disponibilizado no Sistema Mosaico da Anatel, a potência do transmissor P_t é 0,3 kW, que equivale à 54,77 dBm. O ganho da antena transmissora G_t é 4,24 dB e as perdas associadas ao sistema de transmissão L correspondem à 1,36 dB. Portanto, a potência irradiada efetiva (ERP) é 57,65 dBm, que equivale à 0,58 kW. A frequência central é 671 MHz, logo, o comprimento de onda λ é 0,45 m. Por fim, o ganho da antena receptora G_r é 4 dBi ou 1,85 dBd. As estimativas foram calculadas aplicando esses valores na Equação 42.

Na Figura 33 é mostrada uma comparação dos valores estimados pelo modelo de propagação do Espaço livre com os dados medidos em função da distância de separação entre a antena transmissora e local onde a potência foi medida. A avaliação do modelo é realizada através do cálculo dos erros MAE e RMSE, mostrados na Tabela 8.

Figura 33 – Comparação do modelo de propagação do Espaço Livre com os dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV



Fonte: Autor (2021)

Tabela 8 – Avaliação do modelo de propagação do Espaço Livre

MODELO DE PROPAGAÇÃO	MAE	RMSE
Espaço Livre	28,75	29,56

Fonte: Autor (2021)

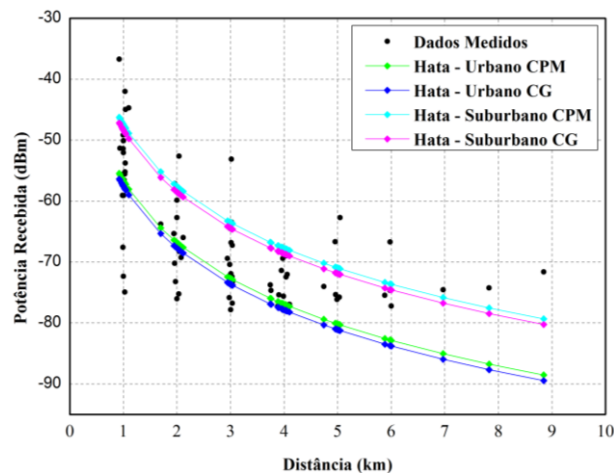
Com base na Figura 33 e nos valores apresentados na Tabela 8, fica claro que a previsão de potência recebida pelo modelo do espaço livre é otimista em relação aos valores reais. Este já era um resultado esperado considerando que a região urbana da cidade de

Mossoró possui prédios e construções de diferentes alturas, portanto, não apresenta linha de visão direta entre as antenas transmissora e receptora. Dessa forma, este não é um modelo adequado para o ambiente da cidade em estudo e foi utilizado com o intuito de ser um parâmetro de comparação para os outros modelos.

6.2.2 Modelo de Hata

A estimativa de potência recebida pelo modelo de Hata seguiu a metodologia descrita na Seção 2.3.3.2. Esse modelo fornece equações para áreas urbanas, suburbanas e abertas com fator de correção para cidades pequenas e médias (CPM) e cidades grandes (CG). Para comparar com as medições realizadas na área urbana foram analisadas quatro variações do modelo Hata: área urbana com fator de correção CPM; área urbana com fator de correção CG; área suburbana com fator de correção CPM; área suburbana com fator de correção CG. Foram utilizadas as alturas de 52,01 m da antena de transmissão e 3 m da antena de recepção nas equações do modelo de Hata. Na Figura 34 é mostrado o gráfico com os dados medidos e as estimativas de potência para cada um dos quatros casos.

Figura 34 – Comparação do modelo de propagação Hata com os dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV



Fonte: Autor (2021)

Diferentemente do modelo de propagação do Espaço Livre, todas as estimativas calculadas pelo modelo de Hata possuem valores próximos ou iguais aos valores reais de potência recebida para as menores distâncias de separação entre as antenas. Até 6 km as estimativas do urbano CPM, urbano CG e suburbano CG são as que mais se aproximam dos

dados reais. Para distâncias maiores, as estimativas do suburbano CPM se aproximam mais dos valores reais, o que pode ser justificado devido a menor concentração de prédios e aglomerações nas regiões mais distantes do centro da cidade. Os valores de MAE e RMSE para cada um dos casos são especificados na Tabela 9.

Tabela 9 – Avaliação do modelo de propagação do Hata

MODELO DE PROPAGAÇÃO	MAE	RMSE
Hata – Urbano CPM	6,04	7,93
Hata – Urbano CG	6,51	8,40
Hata – Suburbano CPM	7,33	9,04
Hata – Suburbano CG	6,76	8,49

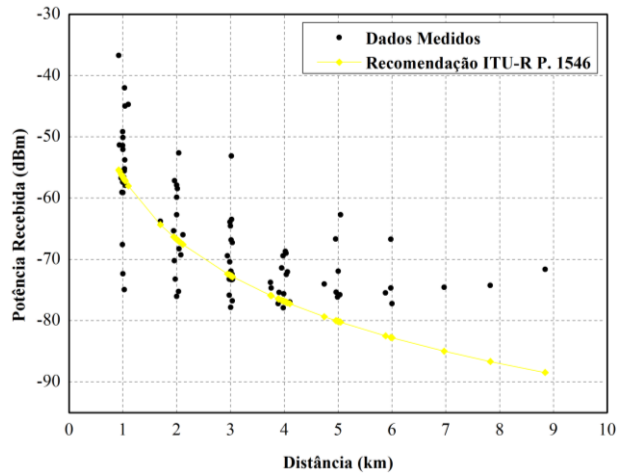
Fonte: Autor (2021)

Analisando os valores da Tabela 9, o modelo Hata – Urbano CPM possui o menor valor de MAE de 6,04 e menor valor de RMSE de 7,93. Isso indica que as estimativas calculadas pelo modelo de Hata considerando o ambiente urbano de uma cidade pequena ou média são mais adequadas, dentre as variações analisadas, para prever a potência recebida na área urbana de Mossoró.

6.2.3 Recomendação ITU-R P. 1546-6

Como já foi citado na seção 2.3.3.4, a Recomendação ITU-R P. 1546-6 fornece resultados compatíveis com o modelo de Hata para distâncias até 10 km e altura da antena de recepção de 1,5 m. As medições em campo não ultrapassaram os 10 km, mas a antena de recepção estava à aproximadamente 3 m de altura. Na Figura 35 são mostradas as estimativas de potência recebida considerando a perda do caminho calculada a partir das Equações 58 e 59. As estimativas foram calculadas sem considerar nenhuma correção. Os valores de MAE e RMSE para as estimativas calculadas são especificados na Tabela 10.

Figura 35 – Comparação do modelo de propagação da Recomendação ITU – R P. 1546-6 com os dados medidos de potência recebida do sinal digital de TV



Fonte: Autor (2021)

Tabela 10 – Avaliação do modelo de propagação da Recomendação ITU-R P. 1546-6

MODELO DE PROPAGAÇÃO	MAE	RMSE
Recomendação ITU-R P. 1546-6	6,02	7,90

Fonte: Autor (2021)

Analisando os dados da Figura 35, para distâncias maiores que 4 km a previsão de potência recebida é pessimista em relação aos dados reais. Obtiveram-se valores de MAE e RMSE próximos, mas ainda menores, dos valores do modelo Hata – Urbano CPM apresentado na seção anterior.

6.2.4 Avaliação dos Modelos de Propagação

O modelo de propagação do espaço Livre é indicado para sistemas de comunicação por satélite, quando há linha de visão. Em centros urbanos há uma variedade de obstáculos, portanto, a propagação do sinal é afetada durante o caminho até o sistema de recepção. Dessa forma, as estimativas por esse modelo são bastante otimistas em relação aos dados reais e por isso possui o maior valor de MAE e RMSE dentre os modelos avaliados.

Também foram avaliadas quatro variações do modelo Hata, todas com os valores de erro bem abaixo do modelo de propagação no Espaço Livre. O modelo Hata considera a perda de propagação no caminho devido aos obstáculos presentes de acordo com o tipo de ambiente.

Dentre as variações analisadas, obteve-se menor valor de MAE e RMSE ao considerar o ambiente em estudo uma área urbana de cidade pequena ou média (CPM).

Por fim, calculou-se a perda de propagação do caminho de acordo com a Recomendação ITU-R P. 1546-6, levando em conta a compatibilidade com o modelo Hata. E como esperado, os resultados são próximos do que foi obtido utilizando o modelo Hata – Urbano CPM. Esse método forneceu estimativas com o menor valor de MAE e RMSE, ou seja, mais próximas dos dados reais. A Tabela 11 apresenta um resumo das métricas utilizadas para avaliar os modelos de propagação.

Tabela 11 – Avaliação dos modelos de propagação

MODELO DE PROPAGAÇÃO	MAE	RMSE
Espaço Livre	28,75	29,56
Hata – Urbano CPM	6,04	7,93
Hata – Urbano CG	6,51	8,40
Hata – Suburbano CPM	7,33	9,04
Hata – Suburbano CG	6,76	8,49
Recomendação ITU-R P. 1546-6	6,02	7,90

Fonte: Autor (2021)

É importante ressaltar que para distâncias maiores (a partir de ~5 km), os métodos analisados resultaram em estimativas pessimistas. O que é compreensível, pois a tendência é que quanto maior a distância do centro urbano da cidade menor seja a concentração de obstáculos e aglomerações. Sendo assim, mesmo com uma distância maior, durante o percurso o sinal sofre menor perda.

6.3 Métodos de Interpolação

A fim de conhecer como o sinal digital de TV está distribuído na região urbana da cidade de Mossoró, foram obtidos os mapas de distribuição espacial ou mapas de contorno a partir da medição da potência nos 82 pontos. O *software Surfer*[®] 13 gerou os mapas de contorno utilizando os métodos de interpolação descritos no Capítulo 4.

A análise dos métodos utilizados é realizada por meio da validação cruzada, que mede a precisão das estimativas determinando o erro associado. O *Surfer*[®] 13 fornece os valores de erro médio (ME) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), Equações 66 e 69, respectivamente. O ME indica o quanto o método está superestimando (valor positivo) ou

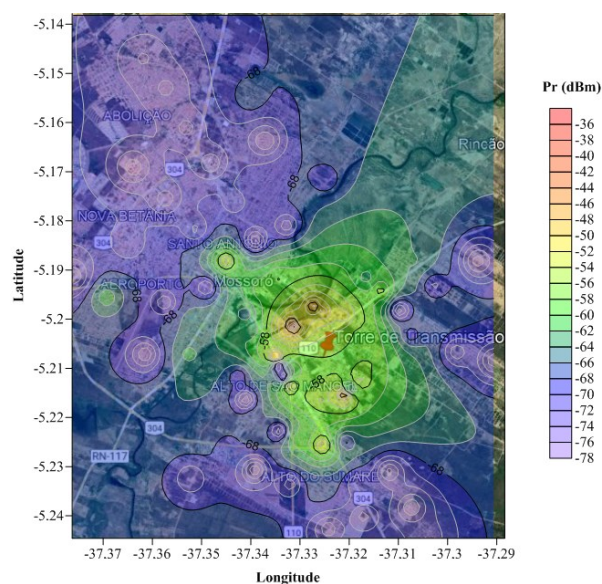
subestimando (valor negativo) a previsão da potência recebida em relação ao dado medido, variando para cima e para baixo em torno de zero. O RMSE expressa a acurácia dos resultados, quanto menor o seu valor melhor o resultado.

Este estudo contribui para o mapeamento de regiões de maior e menor intensidade do sinal digital, servindo de parâmetro para que os radiodifusores possam realizar melhorias no sistema de transmissão, levando em consideração que a estação de TV digital deve atender, no mínimo, 90% da área do município objeto do ato de outorga (MC, 2010). A seguir são apresentados os mapas de contorno e análise dos métodos de interpolação espacial: Inverso Ponderado da Distância; Método de Shepard Modificado; Curvatura Mínima; Função de Base Radial; Krigagem Ordinária.

6.3.1 Inverso Ponderado da Distância

No método Inverso Ponderado da Distância (IDW), quanto mais próximo do local de previsão, maior a influência do ponto medido. A previsão faz uso da Equação 60, onde se adotou parâmetro de potência $p = 2$. O mapa de contorno da potência recebida do sinal digital (P_r) utilizando o método IDW é apresentado na Figura 36. Na Tabela 12 são especificados os valores de ME e RMSE obtidos através do processo de validação cruzada.

Figura 36 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método Inverso Ponderado da Distância



Fonte: Autor (2021)

Tabela 12 – Validação Cruzada para o método de interpolação Inverso Ponderado da Distância

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO	ME	RMSE
Inverso Ponderado da Distância	2,2256	7,6713

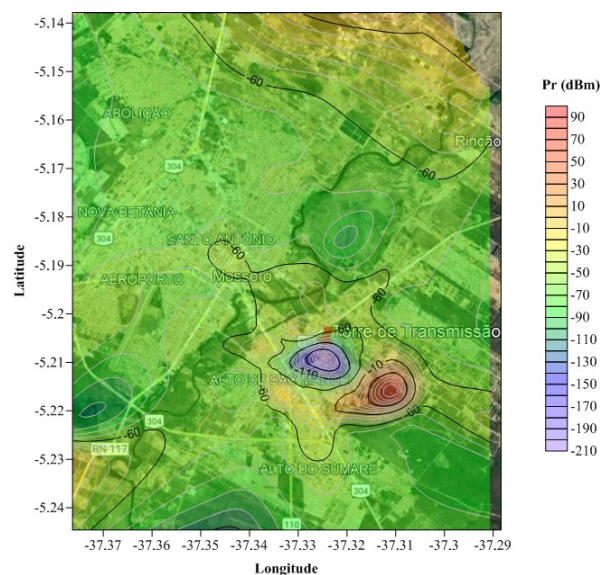
Fonte: Autor (2021)

Na Figura 36, percebe-se que a potência diminui gradativamente conforme aumenta a distância da antena de transmissão. No centro do mapa de contorno há predominância da cor esverdeada, que corresponde à faixa de potência de -64 a -54 dBm. O valor positivo de ME, na Tabela 12, indica que o método IDW é otimista na previsão da potência recebida em relação aos dados medidos. Nota-se também a presença de áreas circulares ao redor dos pontos amostrados que são incoerentes com os contornos estimados no mapa. Essa é uma falha do método IDW, conhecida como efeito mira.

6.3.2 Método de Shepard Modificado

O Método de Shepard Modificado (MSM) aperfeiçoa o método IDW, eliminando o efeito mira por meio do método de mínimos quadrados. O mapa de contorno do MSM é apresentado na Figura 37 e na Tabela 13 são especificados os valores de ME e RMSE para este método.

Figura 37 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o Método de Shepard Modificado



Fonte: Autor (2021)

Tabela 13 – Validação Cruzada para o Método Shepard Modificado

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO	ME	RMSE
Método de Shepard Modificado	-0,4999	7,6659

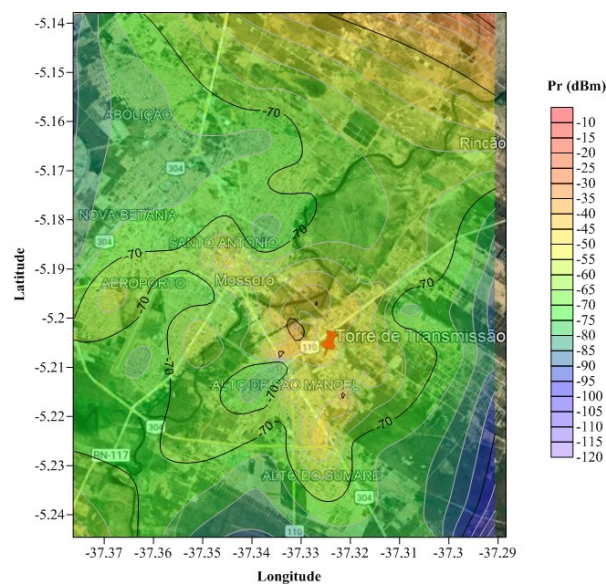
Fonte: Autor (2021)

Diferentemente do mapa de contorno do método IDW, Figura 36, onde a potência diminui gradativamente com a distância da antena de transmissão, o mapa de contorno do MSM tem regiões centrais com faixas de potência bastante diferentes. Este formato não condiz com a real distribuição da potência recebida do sinal digital de TV. O valor do ME é negativo, indicando que este método subestima a previsão de potência recebida em relação aos dados reais. Apesar do mapa não representar adequadamente a distribuição da potência do sinal digital, o valor do RMSE é um pouco inferior ao do método IDW.

6.3.3 Curvatura Mínima

Este método fornece previsões precisas a partir de um número limitado de pontos observados ou medidos, obtendo melhores resultados quando há pouca variação da variável de estudo. A superfície de Curvatura Mínima é apresentada na Figura 38 e os valores de ME e RMSE são mostrados na Tabela 14.

Figura 38 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método de Curvatura Mínima



Fonte: Autor (2021)

Tabela 14 – Validação Cruzada para o método de interpolação Curvatura Mínima

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO	ME	RMSE
Curvatura Mínima	-0,0099	7,9154

Fonte: Autor (2021)

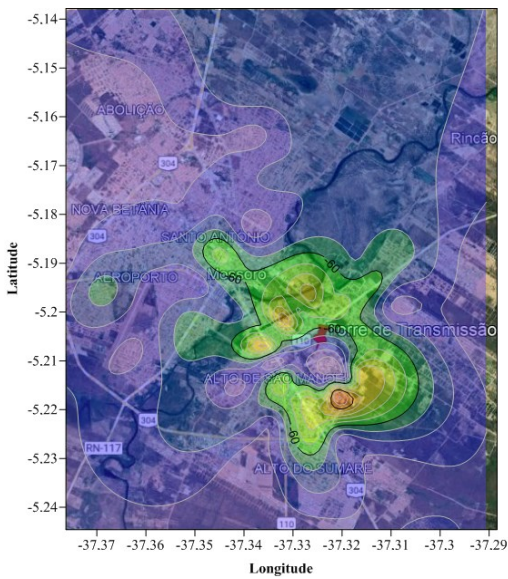
O mapa de contorno mostrado na Figura 38 cumpre o objetivo deste método em fornecer uma superfície de curvatura mínima, onde a variação de potência é suavizada. Há predominância das cores amarelo e verde, que corresponde a faixa de potência de -75 a -40 dBm. Em alguns pontos específicos na região central aparece um tom voltado para a cor laranja, que indica maior intensidade da potência do sinal. O valor de ME é mínimo, mas assim como o método MSM, o método da Curvatura Mínima subestima a previsão de potência em relação aos dados reais.

6.3.4 Função de Base Radial

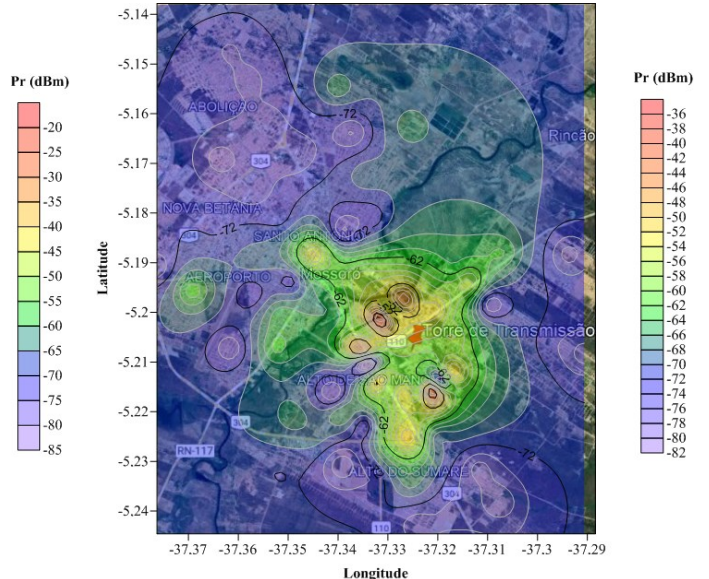
O método Função de base radial, Equação 63, pode ser calculado por diferentes tipos de função de base. As cinco principais funções de base são mostradas na Tabela 3. Cada função de base possui a variável R^2 , que representa o fator de suavização e melhora a precisão da interpolação. O valor do fator de suavização utilizado foi $R^2 = 9,1 \times 10^{-6}$. Os mapas de contorno dos cinco tipos de função de base utilizando o método de Função de Base Radial são apresentados na Figura 39.

O tipo de função de base radial *Multiquadric*, *Inverse Multiquadric* e *Multilog*, mostrados nas Figuras 39(a), 39(b) e 39(c) respectivamente, possuem semelhanças nas formas dos contornos. Há concentração da cor verde no centro do mapa com alguns pontos de maior intensidade da potência. As funções de base *Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline*, mostradas nas Figuras 39(d) e 39(e), possuem diferentes níveis de potência na região central do mapa. Esse formato dos contornos se distancia da representação real em que a potência diminui com a distância. Os valores de ME e RMSE para este método são mostrados na Tabela 15.

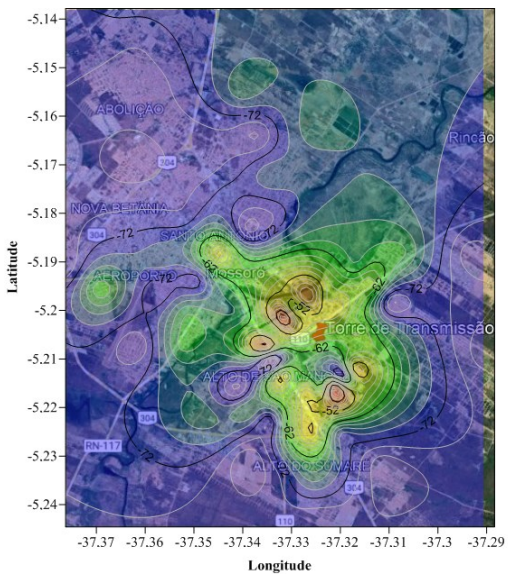
Figura 39 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método Função de Base Radial: (a) *Multiquadric*; (b) *Inverse Multiquadric*; (c) *Multilog*; (d) *Natural Cubic Spline*; (e) *Thin Plate Spline*;



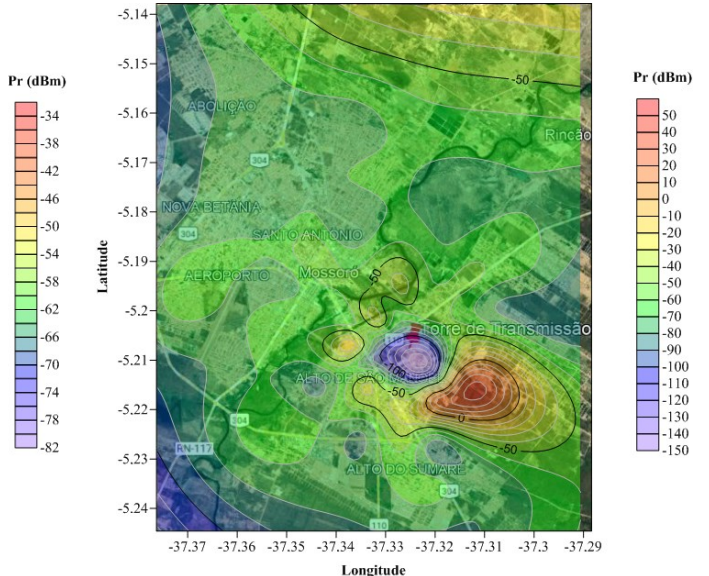
(a)



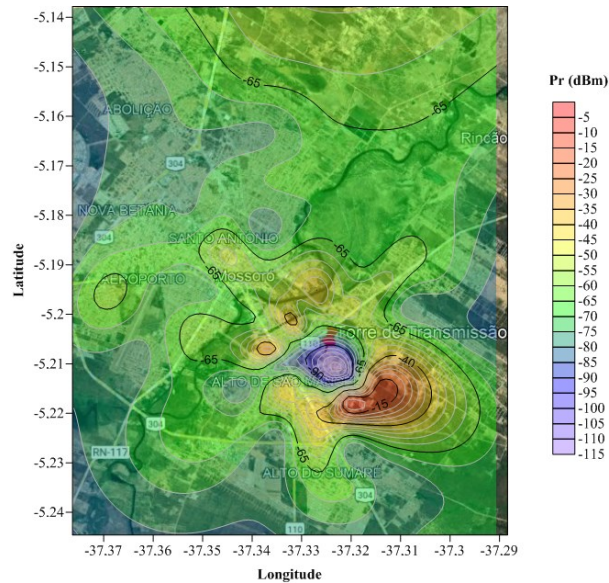
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Autor (2021)

Tabela 15 – Validação Cruzada para o método de interpolação Função de Base Radial

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO	ME	RMSE
Função de Base Radial - <i>Multiquadric</i>	0,4202	9,0242
Função de Base Radial – <i>Inverse Multiquadric</i>	0,5607	7,8751
Função de Base Radial – <i>Multilog</i>	0,0849	8,8113
Função de Base Radial – <i>Natural Cubic Spline</i>	-6,4858	17,8770
Função de Base Radial – <i>Thin Plate Spline</i>	-5,5793	13,8492

Fonte: Autor (2021)

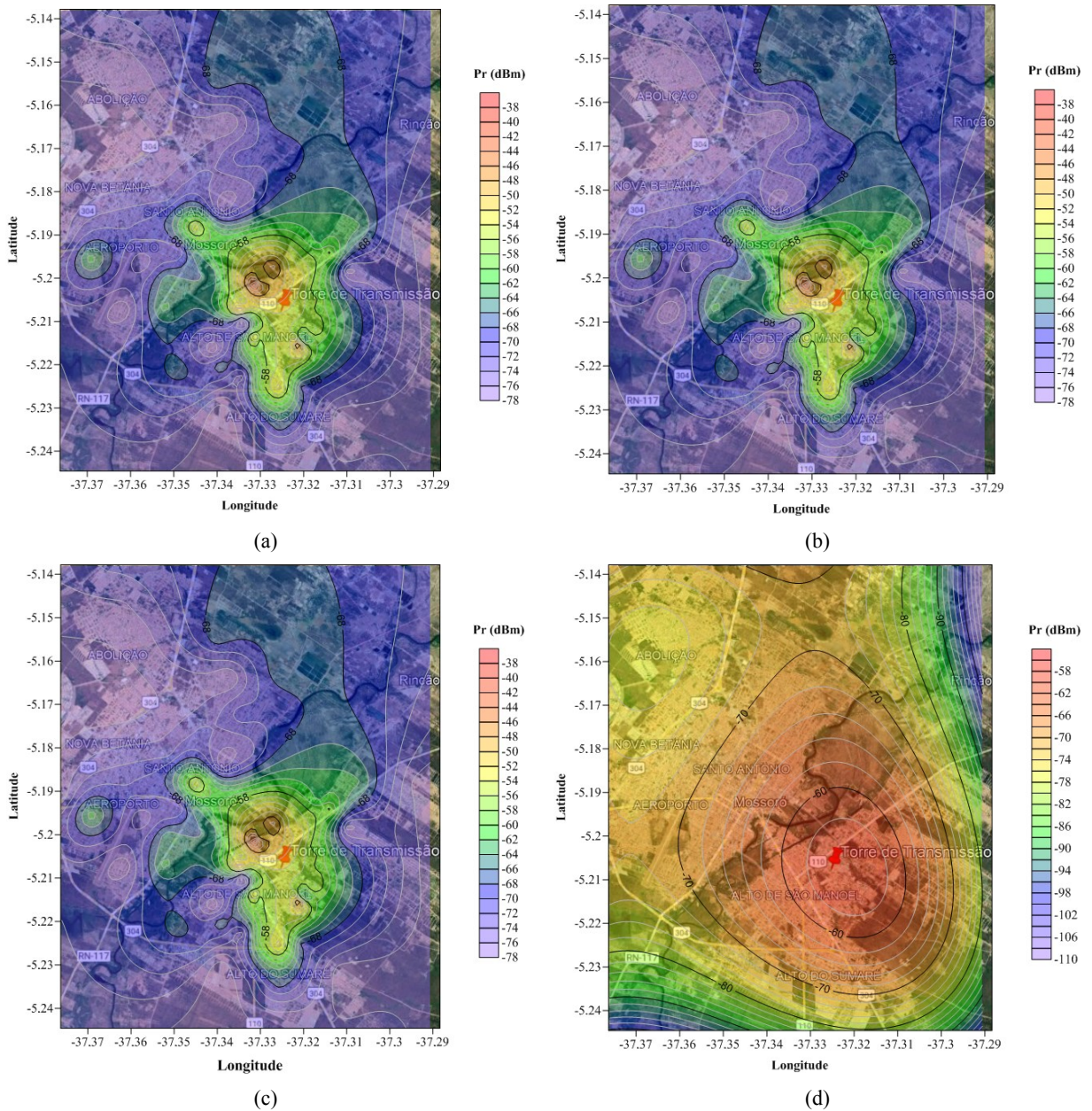
A partir dos dados da Tabela 15, é possível identificar que as funções de base *Multiquadric*, *Inverse Multiquadric* e *Multilog* fornecem uma previsão otimista, enquanto as funções de base *Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline* fornecem uma previsão pessimista em relação aos dados medidos. Dentre os tipos de função de base analisados, o *Inverse Multiquadric* foi o que apresentou menor valor de RMSE, indicando que os resultados estão mais próximos dos dados reais.

6.3.5 Krigagem Ordinária

Krigagem é um método geoestatístico, portanto, requer correlação e dependência espacial entre os dados. Para verificar se há dependência espacial é realizada a análise variográfica. Ao obter um resultado positivo, um dos algoritmos de krigagem faz a previsão

de valores. Foram utilizados os modelos de variograma: linear, exponencial, esférico e gaussiano e o algoritmo de Krigagem Ordinária para prever a potência recebida. A Figura 40 apresenta os mapas de contorno para cada um dos modelos de variograma.

Figura 40 – Mapa de contorno da potência recebida do sinal digital de TV utilizando o método Krigagem Ordinária e modelo de variograma: (a) Linear; (b) Exponencial; (c) Esférico; (d) Gaussiano



Fonte: Autor (2021)

Os mapas de contorno das Figuras 40(a), 40(b) e 40(c) dos modelos de variograma linear, exponencial e esférico, respectivamente, são bem parecidos. Mostram que a potência do sinal diminui com a distância, com maior variação de cores no centro. O mapa de contorno

Figura 40(d), do modelo de variograma gaussiano, também representa a redução da potência recebida do sinal com a distância. No entanto, o mapa de contorno utilizando modelo de variograma gaussiano possui menor variação de cor no centro, fornecendo uma superfície suavizada em relação aos outros modelos. Os valores de ME e RMSE são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Validação Cruzada para o método de interpolação Krigagem Ordinária

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO	ME	RMSE
Krigagem Ordinária - Linear	0,1902	7,6087
Krigagem Ordinária - Exponencial	0,1902	7,6083
Krigagem Ordinária - Esférico	0,1901	7,6087
Krigagem Ordinária - Gaussiano	-0,2899	7,8511

Fonte: Autor (2021)

Assim como os mapas de contorno, os valores de ME e RMSE para os modelos de variograma linear, exponencial e esférico são bem próximos ou iguais. A partir dos valores de ME, pode-se afirmar que a Krigagem Ordinária usando esses três modelos de variograma fornece previsão otimista. O valor de ME do método Krigagem Ordinária usando modelo de variograma gaussiano indica que a previsão é pessimista. Dentre as variações analisadas, o método utilizando modelo de variograma exponencial obteve menor valor de RMSE, ou seja, o resultado mais próximo do real.

6.3.6 Avaliação dos Métodos de Interpolação

Na Tabela 17 são mostrados os valores de ME e RMSE dos métodos de interpolação utilizados na obtenção dos mapas de contorno. Esses valores de erro associados aos métodos foram obtidos através do processo de validação cruzada no software Surfer[®] 13.

Os métodos de interpolação Método de Shepard Modificado, Curvatura Mínima, Função de Base Radial (*Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline*) e Krigagem Ordinária – Gaussiano possuem valores de ME negativo, isso indica que a estimação dos valores de potência recebida é pessimista em relação aos dados medidos. Todos os outros métodos estudados possuem valor de ME positivo, ou seja, foram otimistas e superestimaram as previsões de potência recebida em relação aos valores medidos.

Tabela 17 – Validação Cruzada dos métodos de interpolação

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO	ME	RMSE
Inverso Ponderado da Distância	2,2256	7,6713
Método de Shepard Modificado	-0,4999	7,6659
Curvatura Mínima	-0,0099	7,9154
Função de Base Radial - <i>Multiquadric</i>	0,4202	9,0242
Função de Base Radial – <i>Inverse Multiquadric</i>	0,5607	7,8751
Função de Base Radial – <i>Multilog</i>	0,0849	8,8113
Função de Base Radial – <i>Natural Cubic Spline</i>	-6,4858	17,8770
Função de Base Radial – <i>Thin Plate Spline</i>	-5,5793	13,8492
Krigagem Ordinária - Linear	0,1902	7,6087
Krigagem Ordinária - Exponencial	0,1902	7,6083
Krigagem Ordinária - Esférico	0,1901	7,6087
Krigagem Ordinária - Gaussiano	-0,2899	7,8511

Fonte: Autor (2021)

Dentre os métodos analisados, Krigagem Ordinária com os modelos de variograma Linear, Exponencial e Esférico apresentaram os menores valores de RMSE. Com uma pequena diferença na quarta casa decimal o modelo de variograma Exponencial possui o menor valor de RMSE (7,6083), isso faz dele o método que apresentou a previsão mais coerente com os dados coletados em campo.

7 CONCLUSÃO

Considerando que o processo de digitalização do sinal do sistema de televisão aberta ainda está em andamento, o estudo da propagação do sinal digital é de grande relevância para que os radiodifusores possam desenvolver e aperfeiçoar os serviços de transmissão. Este trabalho apresentou um estudo da propagação do sinal digital de TV na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte. A partir da medição da potência recebida do sinal digital de TV em 82 pontos na região urbana de Mossoró – RN foi realizada uma série de análises.

Inicialmente foi possível identificar dois pontos onde a potência recebida está abaixo do limiar de recepção de $-77,40$ dBm, estabelecido pela ABNT NBR 15604:2020. Os locais com as menores potências recebidas estão a uma distância da antena de transmissão de aproximadamente 3 km ($-77,83$ dBm) e 4 km ($-77,90$ dBm). A maior atenuação do sinal nesses pontos pode estar relacionada à obstáculos e aglomerações em torno do local, já que em distâncias maiores foram obtidos níveis mais elevados de potência.

Com o objetivo de identificar um modelo de propagação que fornece boas estimativas do nível de potência do sinal digital na região delimitada para estudo, foram utilizados os modelos de propagação do Espaço Livre, Hata e a Recomendação ITU-R P. 1546-6. As estimativas foram comparadas com os dados medidos e avaliadas por meio das métricas de erro MAE e RMSE. A Recomendação ITU-R P. 1546-6 foi o método que forneceu as estimativas mais precisas com base nos menores valores de MAE = 6,02 e RMSE = 7,90.

A partir dos dados coletados, a potência recebida do sinal digital foi estimada em toda a área de interesse por meio dos métodos de interpolação. Através do *software Surfer*[®] 13 foram gerados os mapas de distribuição espacial da potência recebida utilizando os métodos: Inverso Ponderado da Distância; Método de Shepard Modificado; Curvatura Mínima; Função de Base Radial; Krigagem Ordinária. A implementação desses métodos de interpolação mostra diferentes interpretações.

Os mapas de contorno dos métodos Inverso Ponderado da Distância, Curvatura Mínima e Krigagem Ordinária ficaram mais próximos da realidade, representando a perda do sinal com a distância. A validação cruzada forneceu os valores de ME e RMSE para cada um dos métodos. A métrica ME permitiu identificar os métodos Método de Shepard Modificado, Curvatura Mínima, Função de Base Radial (*Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline*) e Krigagem Ordinária – Gaussiano como pessimistas, ou seja, estes métodos subestimaram as previsões de potência recebida enquanto os outros métodos superestimaram as previsões de

potência recebida em relação aos valores medidos. E o menor valor de RMSE (7,6083) indicou que o método Krigagem Ordinária com modelo de variograma Exponencial obteve as previsões mais precisas.

Recomendações para Trabalhos Futuros

Baseado neste trabalho, algumas ideias são sugeridas para serem desenvolvidas em trabalhos futuros:

- Realizar estimativas da potência recebida do sinal digital utilizando outros modelos de propagação, a fim de investigar o que apresenta os dados mais precisos considerando o ambiente de Mossoró;
- Variar a quantidade de pontos amostrados e analisar o comportamento dos métodos de interpolação por meio das métricas de erro;
- Medir e analisar o nível de potência recebida do sinal digital nas regiões suburbanas e/ou rurais da cidade de Mossoró.

REFERÊNCIAS

ABERT. **Linha do tempo**. 2020a. Disponível em: <https://memoria.abert.org.br/linha-do-tempo/>. Acesso em: 12 out. 2020.

ABERT. **Televisão do futuro: publicada portaria do DTV-Play**. 2020b. Disponível em: <https://www.abert.org.br/web/notmenu/televisao-do-futuro-publicada-portaria-do-dtv-play.html>. Acesso em: 13 out. 2020.

ABNT. **NBR 15604**: Televisão digital terrestre – receptores. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 68 p.

AKAMINE, C. **Contribuições para distribuição, modulação e demodulação do sistema de TV digital ISDB-T_B**. 2011. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

ALENCAR, M. S. **Digital television systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

ANATEL. **Ato nº 942, de 8 de fevereiro de 2018**. 2018. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/index.php/component/content/article?id=1191>. Acesso em: 17 out. 2021.

ANATEL. **Relatório do canal**. 2020a. Disponível em: http://sistemas.anatel.gov.br/se/eApp/reports/b/srd/resumo_sistema.php?id=57dbabe31b7e1&state=TV-C4. Acesso em: 27 out. 2020.

ANATEL. **Resolução nº 284, de 7 de fevereiro de 2001**. Aprova o regulamento técnico para a prestação do serviço de radiodifusão de sons e imagens e do serviço de retransmissão de televisão. Brasília: Anatel, 7 fev. 2001.

ANATEL. **Resolução nº 398, de 7 de abril de 2005**. 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: Anatel, 7 abr. 2005.

ANATEL. **Resolução nº 583, de 27 de março de 2012**. Altera o regulamento técnico para prestação do serviço de radiodifusão de sons e imagens e de retransmissão de televisão. Brasília: Anatel, 27 mar. 2012.

ANATEL. **Resolução nº 625, de 11 de novembro de 2013**. Aprova a Atribuição, a Destinação e o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 698 MHz a 806 MHz. Brasília: Anatel, 11 nov. 2013.

ANATEL. **Resolução nº 721, de 11 de fevereiro de 2020**. Destina faixas de radiofrequência e aprova o regulamento sobre canalização e condições de uso de radiofrequências para os serviços de radiodifusão e seus ancilares. Brasília: Anatel, 11 fev. 2020b.

ANATEL. **Sinal da TV aberta em Rio Verde (GO) agora é exclusivamente digital.** 2019. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/institucional/o-que-e-rss/46-noticias/1003-sinal-da-tv-aberta-em-rio-verde-go-agora-e-exclusivamente-digital>. Acesso em: 2 nov. 2020.

ANATEL. **Televisão digital.** 2020c. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/setorregulado/televisao-digital>. Acesso em: 12 out. 2020.

APAYDIN, G.; SEVGI, L. **Radio wave propagation and parabolic equation modeling.** Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2017.

ARNOLD, J.; FRATER, M.; PICKERING, M. **Digital television: technology and standards.** Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

AZPURUA, M. A.; RAMOS, K. A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. **Progress In Electromagnetics Research M**, [S.L.], v. 14, p. 135-145, 2010. EMW Publishing. <http://dx.doi.org/10.2528/pierm10083103>.

BARCLAY, L. **Propagation of radiowaves.** 3. ed. London: The Institution of Engineering And Technology, 2013.

BEDICKS, G.; YAMADA, F.; SUKYS, F.; DANTAS, C. E. S.; RAUNHEITTE, L.T.M.; AKAMINE, C. Results of the ISDB-T system tests, as part of digital TV study carried out in Brazil. **IEEE Transactions On Broadcasting**, [S.L.], v. 52, n. 1, p. 38-44, mar. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tbc.2005.856729>.

BOTELHO, A. L. P. **Otimização da escolha de modelo de propagação por medição de campo e inteligência artificial.** 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2019.

BRASIL. **Decreto nº 5.820, de 29 de junho de 2006.** 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, 29 jun. 2006.

BURNS, R. W. **Television: an international history of the formative years.** London: IET, 1998.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: FUKS, S. D.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos.** Brasília: Embrapa, 2004.

CARDOSO, P. E. R. **Avaliação da implementação da TV digital: propostas regulatórias para melhoria da qualidade do serviço prestado.** 2018. 331 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

CHAUDHARI, S.; KOSUNEN, M.; MAKINEN, S.; RAMANATHAN, C.; OKSANEN, J.; LAATTA, M.; RYYNANEN, J.; KOIVUNEN, V.; VALKAMA, M. Spatial interpolation of cyclostationary test statistics in cognitive radio networks: methods and field measurements. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.L.], v. 67, n. 2, p. 1113-1129, fev. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2017.2717379>.

COLEMAN, C. **An introduction to radio frequency engineering**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

CORREIA, P. **Modelação e estimação: uma introdução à geoestatística**. 2010. Disponível em: Laboratório de Estatística e Geoinformação: http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:pira2012:numist_-_modelacao_e_estimacao_-sgems.pdf. Acesso em: 25 out. 2020.

DIDASCALOU, D. L. **Ray-optical wave propagation modelling in arbitrarily shaped tunnels**. 2000. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Tecnologia da Informação, Instituto de Tecnologia de Karlsruhe (Kit), Karlsruhe, 2000.

DIONÍSIO, V.; AKAMINE, C. Comparison of terrestrial DTV systems: ISDB-T_B and ATSC 3.0. **Set International Journal Of Broadcast Engineering**, [S.L.], v. 2017, n. 3, p. 9-14, 1 nov. 2017. Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisao (SET). <http://dx.doi.org/10.18580/setijbe.2017.1>.

ESPERANTE, P. G.; AKAMINE, C.; BEDICKS, G. Comparison of terrestrial DTV systems: ISDB-T_B and DVB-T2 in 6 MHz. **IEEE Latin America Transactions**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 45-56, jan. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tla.2016.7430060>.

FARIAS, M.; CARVALHO, M. M.; ALENCAR, M. S. Digital television broadcasting in Brazil. **IEEE Multimedia**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 64-70, abr. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mmul.2008.25>.

FIGUEIREDO, A. L. **Estudo e mapeamento de campos eletromagnéticos, na faixa de 60 Hz, em uma subestação de alta tensão e em linhas de transmissão de 230 kV**. 2019. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

FRANCFORT, E.; VIEL, M. **TV Tupi do tamanho do Brasil: o desenvolvimento e a implantação da televisão**. Brasília: ABERT, 2020. 1 v. Disponível em: <https://memoria.abert.org.br/tv-tupi-do-tamanho-do-brasil-volume-1/>. Acesso em: 12 out. 2020.

GOMES, C. R. **Modelo de rádio propagação em UHF para ambientes não homogêneos e climas distintos utilizando técnica de aprendizagem de máquina**. 2015. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

GRAAF, S. C. **Natural neighbour kriging**: and its potential for quality mapping and grid design. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – MSc Geoscience and Remote Sensing, Delft University of Technology, 2016.

GRAHAM, A. W.; KIRKMAN, N. C.; PAUL, P. M. **Mobile radio network design in the VHF and UHF bands**: a practical approach. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

GUMUS, K.; SEN, A. Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a digital elevation model. **Geodetski vestnik**, v. 57, p. 523-543, 2013.

HASLETT, C. **Essentials of radio wave propagation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 317-325, 1980. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/t-vt.1980.23859>.

HAYKIN, S.; MOHER, M. **Introduction to analog and digital communications**. 2. Ed. Port Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas modernos de comunicações wireless**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

HAYT Jr, W. H., BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
IBGE. **Acesso à internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em:
https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101705_informativo.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.

IBGE. **Geociências: downloads**. 2020. Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>.
Acesso em: 07 set. 2021.

ITU. **About International Telecommunication Union (ITU)**. 2020. ITU: Committed to connecting the world. Disponível em: <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>. Acesso em: 28 set. 2020.

ITU. **Handbook on digital terrestrial television broadcasting networks and systems implementation**. Genebra: ITU, 2016.

ITU. **Recommendation ITU-R P.1546-6**: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz. Genebra: ITU, 2019.

LAM, N. Siu-Ngan. Spatial interpolation methods: a review. **The American Cartographer**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 129-149, jan. 1983. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1559/152304083783914958>.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C.; CORSI, A. C. **Introdução á confecção de mapas**

pelo software *surfer*. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 08, 2002. Disponível em:
<https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbiental/robertowlourenco/dicas-surfer-02.pdf>. Acesso em: 25 out. 2020.

LI, J.; HEAP, A. D. **A review of spatial interpolation methods for environmental scientists**. Camberra: Geoscience Australia, 2008.

LIU, Shu-Guang; CHEN, X.; PENG, Shu-Hong; MA, Ying-Lian; QIAN, J. A study of two data grid interpolation algorithm based on *surfer* software. **2010 International Conference On Machine Learning And Cybernetics**, [S.L.], p. 1045-1049, jul. 2010. IEEE.
<http://dx.doi.org/10.1109/icmlc.2010.5580628>.

LUO, W.; TAYLOR, M. C.; PARKER, S. R. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. **International Journal of Climatology**, [S.L.], v. 28, n. 7, p. 947-959, 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1583>.

MAGNO, F. N. B.; SOUZA, J. F.; VALENTE, Z. A.; COSTA, J. C.; CAVALCANTE, G. P. S.. Study of the slow fading in indoor environment using parabolic equations. **Microwave and Optical Technology Letters**, [S.L.], v. 49, n. 7, p. 1676-1679, 2007. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1002/mop.22530>.

MC. **Portaria nº 14, de 6 de fevereiro de 2013**. Estabelece diretrizes para a aceleração do acesso ao Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre - SBTVD-T e para a ampliação da disponibilidade de espectro de radiofrequência para atendimento dos objetivos do Programa Nacional de Banda Larga - PNBL. Brasília: Ministério das Comunicações, 6 fev. 2013.

MC. **Portaria nº 276, de 29 de março de 2010**. Brasília: Ministério das Comunicações, 29 mar. 2010.

MC. **Portaria nº 925, de 22 de agosto de 2014**. Brasília: Ministério das Comunicações, 29 ago. 2014.

MCTIC. **Portaria nº 3.492, de 26 de agosto de 2016**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 26 ago. 2016.

ME; MCTI. **Portaria interministerial nº 40, de 24 de julho de 2020**. Altera o Processo Produtivo Básico para o produto Televisor com Tela de Cristal Líquido, industrializado na Zona Franca de Manaus. Brasília: Ministério da Economia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 24 jul. 2020.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Spatial interpolation. In: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographical information systems: principles, techniques, management and applications**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2005. p. 481-492.

MOTOYAMA, R. E. **Proposta de um procedimento de teste de recepção de TV digital com antena indoor**. 2010. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2010.

NESKOVIC, A.; NESKOVIC, N.; PAUNOVIC, G. Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 2-12, 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/comst.2000.5340727>.

OLIVEIRA, R. A. N.; SOUZA, J. F. de; MAGNO, F. N. COZZOLINO B.; K.; CAVALCANTE, G. P. d. S. Propagation path loss prediction using parabolic equations for narrow and wide angles. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EUCAP)*, 7., 2013, Gothenburg. **Anais [...]**. Gothenburg: IEEE, 2013. p. 964-968.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o vesper**. Brasília: Embrapa, 2015.

PADUAN, A. D. S. **As origens de uma grande invenção**. 2012. Disponível em: <https://set.org.br/news-revista-da-set/artigo-news-revista-da-set/as-origens-de-uma-grande-invencao/>. Acesso em: 12 out. 2020.

PAGANI, P.; TALOM, F.; T. PAJUSCO, P.; UGUEN, B. **Ultra-wideband radio propagation channels: a practical approach**. London: Iste Ltd, John Wiley & Sons Inc, 2008.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012.

PROAKIS J. G.; SALEHI, M. **Communication systems engineering**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc, 2002.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications: principles and practice**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002.

RUFO, M.; ANTOLÍN, A.; PANIAGUA, J. M.; JIMÉNEZ, A. Optimization and comparison of three spatial interpolation methods for electromagnetic levels in the AM band within an urban area. **Environmental Research**, [S.L.], v. 162, p. 219-225, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.014>.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SANTANA, T. A. A. **Análise da poluição eletromagnética na região urbana de Mossoró-RN**. 2018. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

SANTANA, T. A. A.; ANDRADE, H. D.; QUEIROZ JÚNIOR, I. S.; SILVA, I.B. T. Comparison of spatial interpolation methods to determine exposure ratio to electric fields in urban environments. **Electronics Letters**, [S.L.], v. 53, n. 18, p. 1250-1252, 31 ago. 2017. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/el.2017.2210>.

SARKAR, T. K.; JI, Z.; KIM, K.; MEDOURI, A.; SALAZAR-PALMA, M. A survey of various propagation models for mobile communication. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 51-82, 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/map.2003.1232163>.

SAUNDERS, S. R.; ARAGÓN-ZAVALA, A. **Antennas and propagation for wireless communication systems**. 2. ed. Chichester, west Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

SEJA DIGITAL. **Relatório Final**: regional Mossoró (RN). São Paulo: Seja Digital, 2019. Disponível em: <https://sejadigital.com.br/nossahistoria/wp-content/uploads/2019/05/Relat%C3%B3rio-Final-Mossor%C3%B3.pdf>. Acesso em: 31 out. 2021.

SEN, A.; GÜMÜSAY, M.; KAVAS, A.; BULUCU, U. Programming an artificial neural network tool for spatial interpolation in GIS - a case study for indoor radio wave propagation of WLAN. **Sensors**, [S.L.], v. 8, n. 9, p. 5996-6014, 25 set. 2008. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s8095996>.

SEYBOLD, J. S. **Introduction to RF propagation**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

SILVA, A. S. A. **Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional**. 2015. 107 f. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) – Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

SIZUN, H. **Radio wave propagation for telecommunication applications**. Berlin: Springer, 2005.

SONG, J.; YANG, Z.; WANG, J. **Digital terrestrial television broadcasting: technology and system**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2015.

TRANSTEL. **Catálogo de produtos 7**. 2009. Disponível em: http://transtelconti.com.br/pdf/Catalogo_Completo.pdf. Acesso em: 28 out. 2020.

VASCO, C. L. **Modelo de propagação empírico para sinais de TV digital em Curitiba**. 2009. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

WINDER S.; CARR J. **Newnes radio and RF engineering pocket book**. 3. ed. Oxford: Newnes, 2002.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZHANG, L.; WU, Y.; LI, W.; RONG, B.; SALEHIAN, K.; LAFLECHE, S.; WANG, X.; PARK, S. I.; KIM, H. M.; LEE, Jae-Young. HUR, N.; ANGUEIRA, P.; MONTALBÁN, J. Layered-division-multiplexing for high spectrum efficiency and service flexibility in next generation ATSC 3.0 broadcast system. **IEEE Wireless Communications**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 116-123, abr. 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mwc.2018.1800092>.