

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO COELHO DOMINGOS

Propagação de Sinal de TV Digital Terrestre em Ambiente Urbano:
Análise da Cobertura em Araguari, MG

Uberlândia

2024

GUSTAVO COELHO DOMINGOS

Propagação de Sinal de TV Digital Terrestre em Ambiente Urbano:
Análise da cobertura em Araguari - MG.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Alexandre Coutinho Mateus

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

D

Domingos, Gustavo Coelho, 1992-

6

7

1

2

Propagação de Sinal de TV Digital Terrestre em Ambiente Urbano:
Análise da Cobertura em Araguari, MG [recurso eletrônico] / Gustavo
Coelho Domingos. - 2024.

2

4

Orientador: Alexandre Coutinho Mateus.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) Universidade Federal
de Uberlândia, Graduação em Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia. Inclui
ilustrações.

1. Sistemas de telecomunicação. I. Mateus, Alexandre
Coutinho, 1971-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações. III. Título.

CDU: 621.391

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GUSTAVO COELHO DOMINGOS

Propagação de Sinal de TV Digital Terrestre em Ambiente Urbano:

Análise da cobertura em Araguari - MG.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Uberlândia, 06 de Agosto de 2024

Banca Examinadora:

Alexandre Coutinho Mateus – Doutor UFU

André Luiz Aguiar Costa – Doutor UFU

Antônio Cláudio Paschoarelli Veiga - Doutor UFU

Gilberto Arantes Carrijo - Doutor UFU

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram
e me ajudaram nesses anos de curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Alexandre Coutinho Mateus por sua orientação, incentivo, paciência e dedicação ao longo deste trabalho de conclusão de curso. Sua expertise e orientação foram fundamentais para a realização deste projeto.

Expresso minha gratidão ao professor Antônio Cláudio Paschoarelli Veiga, que, desde o início desta longa caminhada, me acompanha e aconselha. Seu apoio constante e seus conselhos valiosos foram imprescindíveis para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Agradeço ao Fabio Romero de Souza Junior por sua força, incentivo e companheirismo durante os últimos semestres. Sua presença e motivação foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios encontrados.

Meus sinceros agradecimentos aos amigos Kayré Scott Primon e Guilherme Peres Silva Lemos pela amizade, força e ajuda ao longo desta jornada. Vocês tornaram este percurso mais leve e significativo.

Agradeço às minhas irmãs Andreia e Daniela por todo o apoio e compreensão durante esta etapa. Sua ajuda foi crucial nos momentos de maior necessidade, proporcionando o suporte emocional e prático que tanto precisei.

Aos meus pais, Mariângela e Antonio, minha eterna gratidão. Obrigado pelo amor incondicional, pelo suporte e por acreditarem em mim. Sem vocês, nada disso seria possível. Por fim, agradeço ao Alisson de Carvalho Souto por sua assistência e colaboração na conclusão deste trabalho. Sua ajuda foi de grande importância para o êxito desta jornada acadêmica.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento.

“ Tudo o que temos a decidir é o que
fazer com o tempo que nos é
concedido" - Gandalf.”

(TOLKIEN, 2001, p. 56)

RESUMO

Este trabalho investiga a propagação de sinais de TV digital terrestre (TDT) na cidade de Araguari, Minas Gerais, utilizando modelos de predição de propagação. O objetivo é avaliar a precisão desses modelos e compará-los com dados reais de intensidade de campo coletados em campo.

Foram analisados três modelos: Log-Distância, Okumura-Hata e ITU-R P.1546-6. O modelo Log-Distância demonstrou utilidade para estimativas rápidas em áreas com pouca obstrução, mas mostrou-se menos preciso em áreas urbanas. O modelo Okumura-Hata apresentou maior precisão em áreas com alta densidade de edifícios, porém enfrentou limitações relacionadas à topografia do terreno. O modelo ITU-R P.1546-6 teve o melhor desempenho geral, revelando maior precisão em ambientes urbanos complexos, embora exija maior complexidade de cálculo e dados detalhados.

Este estudo destaca a complexidade da propagação de sinais em ambientes urbanos e a necessidade de calibrar os modelos com dados de campo para aumentar a precisão das previsões. Os resultados indicam a importância de uma abordagem conservadora no planejamento de redes de comunicação, utilizando margens de segurança para garantir a qualidade do serviço.

Palavras-chave: Propagação; Log-Distância; Okumura-Hata; ITU-R P.1546-6; Intensidade de campo; Ambientes urbanos; Predição de propagação.

ABSTRACT

This study investigates the propagation of terrestrial digital TV (TDT) signals in the city of Araguari, Minas Gerais, using propagation prediction models. The aim is to evaluate the accuracy of these models and compare them with actual field intensity data collected on-site.

Three models were analyzed: Log-Distance, Okumura-Hata, and ITU-R P.1546-6. The Log-Distance model proved useful for quick estimates in areas with little obstruction but was less accurate in urban areas. The Okumura-Hata model showed greater accuracy in areas with high building density but had limitations concerning terrain topography. The ITU-R P.1546-6 model achieved the best overall performance, demonstrating greater accuracy in complex urban environments, though it required more complex calculations and detailed data.

This study highlights the complexity of signal propagation in urban environments and the need to calibrate models with field data to increase prediction accuracy. The results underscore the importance of a conservative approach in communication network planning, using safety margins to ensure service quality.

Keywords: Propagation; Log-Distance; Okumura-Hata; ITU-R P.1546-6; Field intensity; Urban environments; Propagation prediction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Propagação de uma onda eletromagnética.....	17
Figura 2 - Propagação de uma onda eletromagnética.....	19
Figura 3 - Curvas de Okumura (A) Atenuação mediana relativa ao Espaço Livre (B) Fator de correção devido o ambiente.....	23
Figura 4- Local onde está instalada a retransmissora Fonte : Google Maps.....	35
Figura 5 - Diagrama de irradiação da polarização (A) horizontal (B) vertical.....	37
Figura 6 Diagrama de elevação vertical para opção de duas fendas.....	37
Figura 7 - Receptor Cellmaster MT8212E.....	39
Figura 8 - Ponto 1 com os valores coletados.....	41
Figura 9 - Tabela organizada.....	43
Figura 10 - Intensidade de campo medido.....	44
Figura 11 - Intensidade de campo medido retirando dados menores que 1 km.....	44
Figura 12 - Valores de Campo médios por ambiente.....	45
Figura 13 - Valores de intensidade do campo calculado para Modelo Log-Distância.....	46
Figura 14 - Valores de Campo médios por ambiente para Log-Distância.....	47
Figura 15 - Valores calculados pelo modelo de Okumura.....	48
Figura 16 - Valores calculados pelo Modelo Okumura dividido por Ambiente.....	48
Figura 17 - Valores calculados pelo modelo ITU-R P.1546-6.....	49
Figura 18 - Valores calculados pelo modelo ITU-R P.1546-6 separados por Ambientes..	50
Figura 19 - Médias de modelos e medição.....	51
Figura 20- Modelo Log-Distância e Valores Medidos.....	52
Figura 21 - Média Modelo Log-Distância e Valores Medidos.....	53
Figura 22 - Modelo Hata e Valores Medidos.....	54
Figura 23 - Média do Modelo Hata e Valores Medidos.....	54
Figura 24 - Modelo ITU e Valores Medidos.....	55
Figura 25 - Média do Modelo ITU e Valores Medidos.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias tabuladas ITU-R P.1546-6.....	27
Tabela 2 - Valores de correção devido ambiente.....	33
Tabela 3 - Informações sobre a geradora.....	36
Tabela 4 - Informações sobre a retransmissora.....	36
Tabela 5 - Informações sobre a linha de transmissão.....	38
Tabela 6- Informações de modulação da retransmissora.....	38
Tabela 8 - Ambientes e siglas.....	42
Tabela 9 - RMSE para cada Modelo.....	57
Tabela 10 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes Obstruídos por Edifícios.....	58
Tabela 11 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes sem Obstruções.....	59
Tabela 12 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes Sombreados.....	59
Tabela 13 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes Urbanos.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ATSC	Advanced Television Systems Committee
ATSC	Advanced Television Systems Committee
EIRP	Potência Efetivamente Irradiada Isotropicamente
GPS	Global Positioning System
HDTV	High-Definition Television
HF	High Frequency
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting
ITU	International Telecommunications Union
LHCP	Left-Handed Circular Polarization
LOS	Line Of Sight
MSE	Mean Square Error
NHK	Nippon Hōsō Kyōkai
RF	Radiofrequência
RHCP	Right-Handed Circular Polarization
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
TDT	Televisão Digital Terrestre
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 MOTIVAÇÃO E METODOLOGIA.....	12
1.2 ESTRUTURA.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 SISTEMA DE TELEVISÃO DIGITAL.....	14
2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	15
2.2.1 POLARIZAÇÃO DE ONDAS.....	17
2.2.2 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE.....	18
2.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	21
3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	22
3.1 MODELO OKUMURA-HATA.....	22
3.2 ITU-R P.1546-6.....	25
3.3 MODELO LOG-DISTÂNCIA.....	33
3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	34
4 METODOLOGIA.....	35
4.1 INTRODUÇÃO.....	35
4.2 TRANSMISSORA.....	35
4.3 RECEPTOR.....	38
4.4 DADOS COLETADOS.....	40
4.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	42
5.1 DADOS DA MEDIÇÃO.....	43
5.2 MODELO LOG-DISTÂNCIA.....	45
5.3 MODELO OKUMURA-HATA.....	47
5.4 MODELO ITU-R P.1546-6.....	49
5.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	50
6 DISCUSSÃO.....	51
6.1 ANÁLISE DO MODELO LOG-DISTÂNCIA.....	52
6.2 ANÁLISE DO MODELO OKUMURA-HATA.....	53
6.3 ANÁLISE DO MODELO ITU-R P.1546-6.....	55
6.4 ANÁLISE DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO.....	57
6.5 ANÁLISE COM RELAÇÃO AO AZIMUTE.....	58
6.6 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DA DISCREPÂNCIA.....	60
6.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	61
7 CONCLUSÃO.....	63
8 REFERÊNCIAS.....	64
9 ANEXO A – GRÁFICOS.....	67
10 ANEXO B – TABELAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de prever a intensidade dos sinais transmitidos via rádio por meio de modelos de propagação automatizados surge como uma ferramenta valiosa para compreender o comportamento do sinal a ser irradiado, antecipando a cobertura disponível e verificando a possibilidade de coexistência com outras estações e de possíveis pontos críticos onde o sinal transmitido não chegue de forma satisfatória.

Devido ao cenário da radiodifusão brasileira, o espectro de frequências é um recurso estratégico, porém limitado, demandando um planejamento e gerenciamento cuidadoso para garantir sua utilização eficiente. A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) desempenha um papel fundamental na supervisão desse espectro, assegurando sua utilização coordenada. O conhecimento antecipado da intensidade do campo elétrico do sinal é essencial para determinar se as características de propagação do rádio estão alinhadas com os requisitos da área de serviço, proporcionando uma maior segurança operacional aos projetistas.

1.1 MOTIVAÇÃO E METODOLOGIA

A cidade de Araguari, localizada em Minas Gerais, Brasil, foi escolhida como cenário para este estudo devido à sua representatividade como uma área urbana típica caracterizada por não ser um município de grande porte e não sendo um município de pequeno porte, com características que podem ser encontradas em muitas outras cidades do país. Embora Araguari possa não apresentar uma topografia tão variada quanto outras regiões, ainda assim possui uma densa distribuição de edifícios e estruturas urbanas que podem influenciar a propagação de ondas eletromagnéticas.

Analisar a propagação do sinal de TV Digital nessa região oferece a oportunidade de compreender como os modelos de propagação se comportam em ambientes urbanos comuns, permitindo extrair insights relevantes para o planejamento e a otimização de sistemas de transmissão digital em diferentes contextos urbanos.

Realizando a comparação entre os modelos de propagação, como o Okumura-Hata, Log-distância e ITU-R P.1546-6, permite avaliar sua adequação em diferentes cenários urbanos, fornecendo orientações importantes para o planejamento e a otimização de sistemas de transmissão digital. Além disso, entender como esses modelos se comparam aos dados reais de intensidade de campo eletromagnético coletados em campo pode revelar insights sobre as

limitações e as áreas de aprimoramento desses modelos, contribuindo para o desenvolvimento de técnicas mais precisas de predição de cobertura de sinal em ambientes urbanos.

Ao investigar a propagação das ondas eletromagnéticas em Araguari, este estudo não apenas oferece contribuições práticas para o setor de telecomunicações, mas também amplia nosso conhecimento sobre os fenômenos de propagação de sinais em ambientes urbanos, beneficiando o desenvolvimento de tecnologias de comunicação digital.

1.2 ESTRUTURA

A organização deste trabalho se encontra distribuída em sete capítulos. O primeiro capítulo aborda a motivação, metodologia e estrutura do trabalho. O segundo apresenta os conceitos básicos de televisão digital, propagação de ondas e modelos de propagação. O terceiro descreve os modelos de propagação utilizados no estudo: Log-Distância, Okumura-Hata e ITU-R P.1546-6. O quarto explica a abordagem experimental adotada, incluindo a coleta de dados, critérios de classificação e tratamento dos dados. O quinto apresenta os resultados obtidos pelos modelos de propagação e os dados de medição. O sexto analisa os resultados, destaca as vantagens e limitações dos modelos e discute as implicações práticas para o planejamento de redes de comunicação. O sétimo e último capítulo resume as principais conclusões do estudo e sugere trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA DE TELEVISÃO DIGITAL

O desenvolvimento dos sistemas de TV digital remonta às décadas de 1980 e 1990, períodos marcados por intensa pesquisa e experimentação em várias partes do mundo. Esses anos foram cruciais para a concepção e evolução dos primeiros padrões e tecnologias que moldaram a transição da TV analógica para a era digital [1]. O sistema digital foi uma grande evolução em relação ao analógico devido a vários motivos, o fator que mais destacou-se foi a melhoria da qualidade de imagem, com o sumiço dos famosos chuviscos, fantasmas, distorção de cores, ruídos e interferências exteriores que acarretava a queda de qualidade e experiência do usuário quanto a programação assistida [2].

Estados Unidos e Japão se destacaram nesse cenário como pioneiros, cada um contribuindo de maneira significativa para o avanço tecnológico e a definição dos padrões que fundamentam os sistemas de TV digital modernos.

Nos Estados Unidos, o processo de desenvolvimento foi liderado por iniciativas tanto do setor privado quanto do governo. Organizações como a Advanced Television Systems Committee (ATSC) desempenharam um papel crucial na definição de padrões e diretrizes para a transmissão digital de televisão. Esse esforço culminou na adoção do padrão ATSC, que estabeleceu as bases para a transmissão de alta definição e a introdução de recursos avançados, como a transmissão de áudio multicanal e serviços interativos.

Enquanto isso, no Japão, a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas de TV digital foram liderados por empresas como a NHK (Nippon Hōsō Kyōkai), a emissora pública japonesa. O sistema japonês de TV digital, conhecido como Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB), foi desenvolvido com foco na eficiência espectral e na capacidade de fornecer serviços avançados, como televisão de alta definição, serviços interativos e transmissão de dados [3].

Ambos os países enfrentam desafios únicos durante o processo de desenvolvimento, desde questões técnicas até considerações políticas e econômicas. No entanto, suas contribuições foram fundamentais para o avanço global da TV digital, influenciando diretamente os padrões adotados por outras nações e regiões ao redor do mundo.

Além dos Estados Unidos e do Japão, várias nações europeias também desempenharam papéis importantes no desenvolvimento de sistemas de TV digital, cada uma contribuindo com suas próprias abordagens e padrões. Esse período de intensa inovação e colaboração internacional pavimentou o caminho para a era moderna da televisão digital, oferecendo uma

experiência de visualização aprimorada e uma gama expandida de serviços para os espectadores em todo o mundo.

No Brasil temos o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) é o padrão de televisão digital adotado no Brasil. O SBTVD foi desenvolvido com o objetivo de modernizar a transmissão televisiva, melhorando a qualidade de imagem e som, aumentando a eficiência do espectro e possibilitando a oferta de serviços adicionais, como interatividade e transmissão de dados [4].

O processo de desenvolvimento do SBTVD envolveu colaboração entre diversas entidades públicas e privadas, incluindo emissoras de televisão, fabricantes de equipamentos eletrônicos e instituições de pesquisa. O modelo adotado pelo Brasil foi influenciado por padrões já estabelecidos, como o ATSC dos Estados Unidos e o ISDB do Japão. Uma das características mais notáveis do SBTVD é a sua capacidade de se adaptar às peculiaridades do território brasileiro, que possui dimensões continentais e uma grande diversidade geográfica. Isso significa que o sistema foi projetado para operar de forma eficiente em diferentes áreas do país, incluindo regiões urbanas densamente povoadas e áreas rurais remotas [4].

Entre as vantagens do SBTVD estão a transmissão em alta definição (HDTV), a possibilidade de transmissão simultânea de múltiplos programas em um mesmo canal (multiprogramação) juntamente com a interatividade através do Ginga, um *middleware* que permite o desenvolvimento de aplicativos interativos para televisão digital, e a capacidade de transmissão de dados adicionais, como guias eletrônicos de programação e informações complementares sobre os programas [5].

2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Uma onda eletromagnética é uma forma de transmissão de energia pelo espaço, caracterizada pela oscilação simultânea dos campos elétrico e magnético. Diferente de outros tipos de ondas, como as sonoras, as ondas eletromagnéticas não precisam de um meio material para se propagarem. Elas podem viajar pelo vácuo, tal como a luz do Sol que atinge a Terra. Isso acontece porque ondas eletromagnéticas são produzidas por partículas carregadas em movimento, que geram um campo elétrico variável, o qual, por sua vez, cria um campo magnético variável, e assim sucessivamente. Esse ciclo contínuo permite que a onda se propague por conta própria.

Pense em uma onda eletromagnética que se move pelo espaço livre, sem encontrar nada que a atrapalhe. Ela se espalha por todos os lados, como a luz que sai de uma lâmpada ligada em

uma noite sem lua. A origem dessa onda, que costuma ser chamada de radiador isotrópico, é como um farol, que lança energia igualmente para todas as direções. Essa energia se distribui em ondas esféricas, como as ondas que se criam quando atiramos uma pedra em um lago tranquilo.

A intensidade da onda, isto é, a quantidade de energia que ela transporta, diminui conforme se afasta da origem. É como a luz solar, que fica menos forte conforme se afasta da Terra. Essa relação é inversamente proporcional ao quadrado da distância, o que significa que a intensidade cai rapidamente conforme a onda se move. Embora na realidade não exista uma origem que irradie perfeitamente para todos os lados, o conceito de radiador isotrópico é essencial na teoria de antenas. Ele nos ajuda a entender como as antenas funcionam, emitindo e recebendo ondas eletromagnéticas.

As ondas eletromagnéticas que percorrem o espaço livre o fazem com velocidade fixa em todas as direções. Isso é diferente do que acontece quando a onda se move em um meio material, como a ionosfera, onde a velocidade da onda muda de acordo com a direção. As leis que regem o comportamento das ondas eletromagnéticas, tanto na emissão quanto na captação, foram descritas por James Clerk Maxwell em suas famosas equações de Maxwell, publicadas em 1873. Essas equações são como um mapa que nos orienta na compreensão do mundo incrível das ondas eletromagnéticas e suas várias aplicações [6].

Quando a energia elétrica é fornecida a um sistema ou circuito elétrico, tensões e correntes são criadas em todo o sistema ou circuito certas relações que seguem a teoria dos circuitos elétricos ou mais precisamente de acordo com as equações de Maxwell.

$$\nabla \times H = \epsilon_0 \frac{\delta E}{\delta t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \mu_0 \frac{\delta H}{\delta t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (3)$$

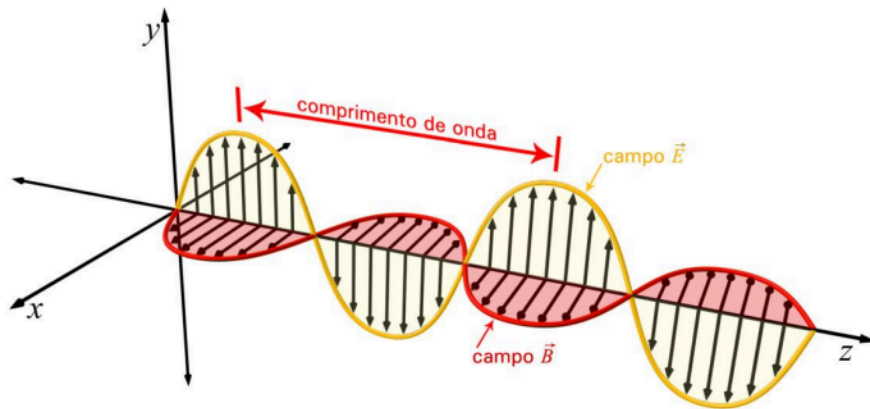
$$\nabla \cdot H = 0 \quad (4)$$

Quando a tensão é aplicada aos terminais de uma antena, ao longo do fio da antena também aparecem a distribuição de tensões e correntes e uma certa quantidade de energia vaza para o espaço ao redor da antena. Esta energia escapa na forma de ondas eletromagnéticas. Ondas eletromagnéticas são oscilações que se propagam através do espaço livre com velocidade com a velocidade da luz, ou seja, $c = 299.792,5 \text{ km/s}$ [7].

2.2.1 POLARIZAÇÃO DE ONDAS

A polarização de uma onda eletromagnética refere-se à orientação física do campo elétrico à medida que a onda se propaga no espaço. Quando o vetor campo elétrico descreve uma linha reta em um plano perpendicular à direção de propagação, temos a polarização linear. Se esse vetor descreve uma elipse, temos a polarização elíptica, e quando descreve um círculo, temos a polarização circular. Existem duas formas de polarização circular: à direita (*right-handed circular polarization* RHCP) e à esquerda (*left-handed circular polarization* LHCP), determinadas pelo sentido de rotação dos campos elétrico e magnético que emanam da antena [8].

Figura 1 - Propagação de uma onda eletromagnética



Fonte [7]

Durante a transmissão e recepção ideais, é crucial que as antenas transmissora e receptora estejam polarizadas da mesma forma. Idealmente, uma onda polarizada verticalmente seria recebida como 0 V por uma antena horizontal e vice-versa. No entanto, em transmissões de longa distância, a polarização das ondas pode sofrer alterações devido a vários efeitos de propagação no espaço livre, resultando na recepção de sinais mesmo quando as polarizações das antenas não são perfeitamente iguais [6].

A polarização de uma onda é uma característica intrínseca da antena transmissora, onde uma antena vertical irradia uma onda com polarização vertical, enquanto uma antena horizontal irradia uma onda com polarização horizontal. Além da polarização linear, circular e elíptica, outras formas podem existir, cada uma influenciando a propagação e a recepção das ondas

eletromagnéticas. Este conceito é essencial na compreensão do comportamento das ondas eletromagnéticas e na otimização dos sistemas de transmissão e recepção [8].

2.2.2 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

Os canais não guiados desempenham um papel essencial nas comunicações sem fio, sendo responsáveis por possibilitar a propagação e recepção das ondas eletromagnéticas em diversos contextos. Estes canais apresentam uma série de características distintas que exercem influência direta na eficácia e eficiência dos sistemas de comunicação que deles fazem uso.

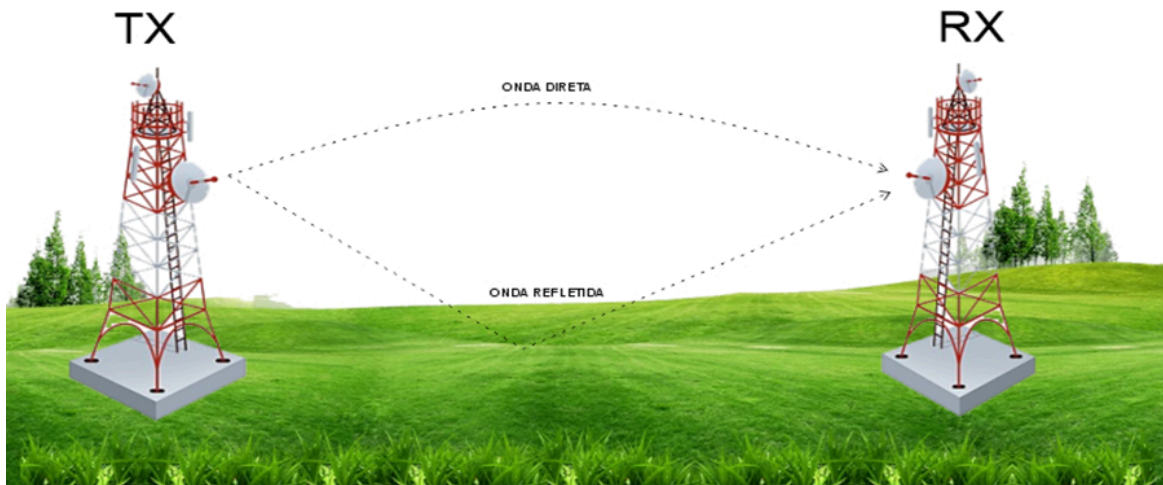
Uma das características fundamentais dos canais não guiados é a propagação da onda emitida pela antena transmissora até a antena receptora através do espaço livre. Nesse processo, a onda eletromagnética enfrenta diferentes obstáculos e condições atmosféricas que podem afetar sua integridade e intensidade. Além disso, à medida que a onda se afasta da fonte emissora, ocorre uma perda de potência irradiada que aumenta conforme a distância percorrida, seguindo uma relação quadrática ou cúbica dependendo do contexto, como é o caso das comunicações móveis celulares.

Essa perda de potência é um dos principais desafios enfrentados nas comunicações sem fio, especialmente em ambientes urbanos densamente povoados ou em áreas geograficamente desafiadoras, onde obstáculos físicos como edifícios, montanhas e florestas podem interferir na propagação do sinal. Além disso, fatores atmosféricos como partículas, vapores e gases, juntamente com condições climáticas adversas, como chuva e neve, contribuem para a atenuação do sinal, reduzindo sua intensidade e alcance.

Os canais não guiados no espaço livre podem ser classificados em quatro tipos principais, levando em consideração uma variedade de fatores, como o tipo de onda, o ângulo de elevação da antena, as características das camadas troposféricas e ionosféricas, bem como o tipo de enlace utilizado. Esses tipos incluem a propagação de ondas terrestres, espaciais ou superficiais, a propagação troposférica, a propagação celestial e a propagação no espaço exterior.

A propagação de ondas terrestres pode ser compreendida tanto como onda superficial, que segue os contornos da superfície terrestre, resultando em um campo elétrico inclinado devido a perdas na crosta terrestre, quanto como onda espacial, originada pela difração ou reflexão da onda no meio, combinando a onda direta com a onda refletida. Já a propagação troposférica ocorre quando as ondas são refletidas ou refratadas na troposfera devido à variação do índice de refração, resultando em curvatura no sinal.

Figura 2 - Propagação de uma onda eletromagnética



Fonte : O autor

Por sua vez, a propagação celestial utiliza a ionosfera para reflexão das ondas de rádio, dentro de limites específicos de frequência e ângulo de elevação da antena. A ionosfera, uma região ionizada na atmosfera superior, é essencial para este tipo de propagação, refletindo as ondas de volta à Terra. Além disso, o ruído introduzido nas antenas, proveniente de diversas fontes, incluindo o ruído atmosférico natural e o ruído cósmico, é um fator crítico a ser considerado nesse tipo de propagação.

O comportamento do ruído atmosférico varia com a frequência, sendo o ruído cósmico predominante em determinadas faixas de frequência. Essas características dos canais não guiados são cruciais para compreender e otimizar sistemas de comunicação sem fio em uma variedade de contextos. A propagação por onda celeste utiliza a ionosfera como um meio natural ionizado para a reflexão das ondas de rádio dentro de certos limites de frequência e ângulo de elevação da antena.

A ionosfera, uma região localizada entre aproximadamente 70 e 450 km acima do nível do mar, apresenta variações significativas ao longo do dia, das estações do ano e de fatores geográficos e solares, influenciando diretamente a propagação das ondas. O ângulo crítico (θ) é um aspecto importante nesse contexto, indicando o ângulo de incidência da onda que resulta em sua reflexão pela ionosfera e retorno ao meio de origem.

Esta propagação é utilizada em sistemas de comunicação que exploram a ionosfera ou a troposfera como meio de propagação, seja de forma natural ou artificial, através do uso de satélites e balões. Por fim, o fenômeno de propagação no espaço exterior permite que o sinal ultrapasse a camada ionosférica, penetrando no espaço sideral. Essa forma de propagação é frequentemente utilizada em transmissões via satélite, aproveitando as vantagens oferecidas por esse meio de comunicação. A seleção adequada de cada canal de comunicação depende das características específicas do sistema projetado [8].

No vácuo, as ondas eletromagnéticas embarcam em uma jornada sem fim, mas sua energia se dissipa à medida que se propagam pelo espaço. Chuva, neblina e nuvens se tornam obstáculos em seu caminho, intensificando a atenuação, especialmente em comunicações via satélite ou enlaces de micro-ondas.

Ao penetrar em materiais condutores imperfeitos, como solo ou água, as ondas enfrentam um novo desafio: as perdas ômicas. Essas perdas, geradas pela corrente de condução no meio, podem reduzir drasticamente a intensidade do sinal e limitar a profundidade de penetração. Essa atenuação é implacável, aumentando com a frequência da onda.

Em frequências mais baixas, as ondas eletromagnéticas assumem um novo papel. Elas conquistam maior alcance no espaço, contornando obstáculos com maestria, e penetram com mais facilidade em meios condutores imperfeitos, como água e solo. Essa capacidade as torna ferramentas essenciais para comunicações submarinas e sondagens, desvendando os segredos do mundo subaquático e do interior da Terra. A velocidade de propagação no vácuo é a velocidade da luz: $c = 3 \times 10^8$ m/s. O comprimento de onda no espaço livre é dado pela fórmula:

$$\lambda = c/f \quad (5)$$

As condições atmosféricas e os obstáculos, como montanhas, edifícios, íons e elétrons na ionosfera, além dos gases na superfície terrestre, são como maestros que orquestram a propagação das ondas eletromagnéticas.

Em geral, as ondas se propagam em linha reta, mas podem sofrer desvios ao encontrar obstáculos em seu caminho [6].

- Frequências acima da faixa de HF ($f > 30$ MHz): as ondas se propagam em linha reta, atravessando a troposfera próxima à superfície da Terra.
- Frequências abaixo da faixa de HF ($f < 30$ MHz): as ondas se propagam ao longo da superfície terrestre, combinando difração com um efeito similar a um guia de onda entre a superfície e a camada mais baixa da atmosfera (ionizada).

2.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A revisão bibliográfica sobre sistemas de TV digital explorou a evolução da tecnologia desde os primeiros sistemas até o SBTVD brasileiro, destacando os benefícios da transmissão digital em relação ao analógico, como a qualidade aprimorada da imagem e do som, a maior eficiência do espectro e a possibilidade de serviços interativos. A compreensão dos conceitos de propagação de ondas eletromagnéticas, como a polarização de ondas e a propagação no espaço livre, forneceu a base para a análise dos modelos de previsão de propagação. A análise da influência de fatores como a distância, obstáculos, topografia e condições atmosféricas na propagação do sinal de TDT foi fundamental para contextualizar os modelos utilizados e interpretar os resultados obtidos.

3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

A televisão digital terrestre (TDT) transcende a mera evolução tecnológica, configurando-se como um poderoso instrumento para a democratização do acesso à informação e ao entretenimento. Através de sua inigualável qualidade de imagem e som, a TDT abre portas para um universo de possibilidades, promovendo a inclusão social e o desenvolvimento cultural de comunidades em todo o país.

No entanto, a qualidade do sinal de TV digital não surge por acaso. Diversos fatores, como a distância entre o transmissor e o receptor, os obstáculos físicos e as características topográficas do terreno, influenciam diretamente na recepção do sinal. É nesse contexto que os modelos de predição de propagação assumem um papel fundamental.

Esses modelos, como o renomado Okumura-Hata e o consagrado ITU-R P. 1546, permitem estimar com precisão a cobertura do sinal em um determinado local, mapeando áreas com recepção deficiente e norteando estratégias para otimizar a qualidade do serviço. Através da análise meticulosa desses modelos, podemos desvendar os segredos da propagação do sinal de TV digital, garantindo que essa tecnologia essencial alcance cada canto do país, promovendo a inclusão e o desenvolvimento social.

Neste capítulo, embarcaremos em uma jornada fascinante para explorar em detalhes os modelos de predição de propagação. Mergulharemos em seus fundamentos, compararemos suas características e aplicaremos seus conhecimentos para solucionar os desafios da TDT. Ao final, teremos adquirido uma compreensão profunda dos mecanismos que garantem a entrega de um sinal de TV digital de alta qualidade, capacitando-o a contribuir para o avanço contínuo dessa tecnologia transformadora.

3.1 *MODELO OKUMURA-HATA*

O Modelo Okumura-Hata representa um avanço em relação ao modelo original de Okumura. Para compreendermos plenamente o Modelo Hata, também conhecido como Modelo Okumura-Hata, é crucial ter uma compreensão sólida do trabalho inicial de Okumura. O modelo de Okumura foi concebido como uma ferramenta de previsão de sinal em ambientes urbanos, cobrindo frequências de 150 MHz a 1920 MHz e distâncias de transmissor para receptor variando de 1 km a 100 km. Além disso, ele é aplicável a alturas de estação base entre 30m e 1 km.

O modelo original baseia-se em curvas derivadas de extensas medições utilizando antenas omnidirecionais verticais tanto para a estação base quanto para a receptora. Essas curvas são plotadas em função das frequências e distâncias mencionadas anteriormente. Para determinar as perdas no caminho, utilizamos a seguinte equação:

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (6)$$

L_{50} é a mediana do valor da perda no caminho de propagação

L_F é a perda por propagação no espaço livre

A_{mu} é a atenuação mediana no espaço livre

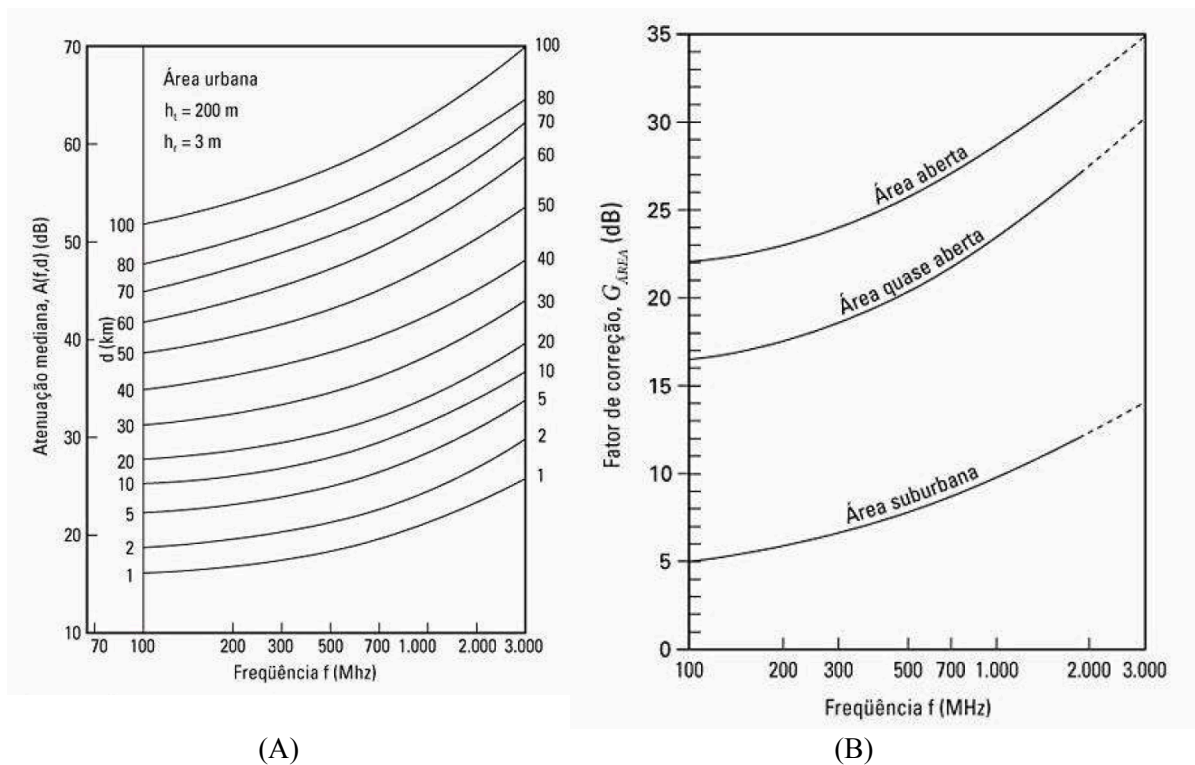
$G(h_{te})$ é o fator de ganho da altura da antena transmissora

$G(h_{re})$ é o fator de ganho da altura da antena receptora

G_{AREA} é o ganho devido o tipo de ambiente

Foram desenvolvidos dois gráficos conhecidos como as curvas de Okumura, com fatores de correção incorporados.

Figura 3 - Curvas de Okumura (A) Atenuação mediana relativa ao Espaço Livre (B) Fator de correção devido o ambiente



Fonte [9]

No entanto, é importante ressaltar que esse modelo é baseado em medições, não oferecendo uma explicação analítica completa de seus resultados. Uma das principais limitações do modelo de Okumura é sua resposta lenta a mudanças abruptas de terreno, tornando-o mais adequado para uso em áreas urbanas e suburbanas. Abaixo estão representadas as curvas de Okumura.

O primeiro gráfico mostra curvas de frequências pelas distâncias para se encontrar o A_{mu} , já o segundo tem como objetivo encontrarmos o fator de correção G_{AREA} devido a frequência e o tipo de área a ser estudada: suburbana, quase aberta e área aberta [9].

O modelo de Hata [10] representa uma interpretação prática das informações relacionadas aos valores de perda apresentados por Okumura, sendo válido na faixa de frequência de 150 MHz até 1500 MHz. O modelo desenvolvido por Hata tem como base uma equação como padrão e outras para correções, a equação padrão é:

$$L_{50}(urbano)(dB) = 69,55 + 26,16 \log \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d \quad (7)$$

f_c é a frequência em Hz;

h_{te} é a altura da antena transmissora em metros;

h_{re} é a altura da antena receptora em metros;

d é a distância entre transmissor e receptor em km

$a()$ é o fator de correção, que depende da área.

Para cidades de médio porte usamos a equação:

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

E para cidades grandes usamos as equações:

$$a(h_{re}) = 8,299(\log \log 1,54h_{re})^2 - 1,1 \text{ dB} \quad (9)$$

Esta é válida para frequências de corte menores ou iguais a 300 MHz, superiores usamos a equação:

$$a(h_{re}) = 3,2 (\log \log 11,75h_{re})^2 - 4,97 \text{ dB} \quad (10)$$

Hata também desenvolveu fórmulas baseadas nas curvas de Okumura para regiões suburbanas e regiões rurais abertas, porém estas equações possuem limitação da distância d que é de 1 km. Assim para regiões suburbanas temos:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urbano) - 2(\log \log \frac{f_c}{28})^2 - 5,4 dB \quad (11)$$

E para zonas rurais abertas temos:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urbano) - 4,78(\log \log f_c)^2 + 18,33 \log \log f_c - 40,94 dB \quad (12)$$

Apesar de Hata ter apresentado uma solução matemática para as curvas de Okumura, ele não definiu os conceitos de urbano e rural, neste caso possuímos duas fontes: Veiga [11] e o IBGE [12]. Segundo o IBGE, os municípios considerados urbanos são aqueles que 50% da população reside na cidade e o município rural é aquele que 50% da população reside no campo. Agora a definição de Veiga temos uma classificação mais precisa definindo como município essencialmente rurais aqueles com até 50 mil habitantes e menos de 80 hab./km², os municípios relativamente rurais, aqueles com uma população no intervalo de mais de 50 a 100 mil habitantes, ou cuja densidade supere os 80 hab./km², mesmo que tenham menos de 50 mil habitantes, e municípios essencialmente urbanos, aqueles com mais de 100 mil habitantes.

Com estes conceitos agora formados precisamos dos dados da localização escolhida para testes no caso o município de Araguari Minas Gerais no último censo possui uma população de 117.808 pessoas e uma densidade populacional de 43,16 hab./km², assim iremos assumir como área urbana a área em análise neste trabalho [13].

3.2 ITU-R P.1546-6

Foi selecionado o segundo método para análise, que é a recomendação ITU-R P.1546-6 [14]. Este método consiste em prever a propagação de um caminho específico para serviços terrestres ponto-a-área na faixa de frequência de 30 MHz a 3 GHz. Neste estudo, operaram na faixa de 572 a 578 MHz, onde a recomendação se adequa aos valores que serão avaliados. Além disso, a recomendação está sujeita a limites específicos e destinada ao uso em circuitos de rádio

troposféricos em caminhos terrestres, marítimos e/ou mistos terra-mar com até 1.000 km de comprimento, para alturas efetivas de antena de transmissão inferiores a 3.000 m. O método baseia-se na interpolação/extrapolação de curvas de intensidade de campo derivadas empiricamente em função da distância, altura da antena, frequência e porcentagem de tempo. O cálculo também inclui correções nos resultados obtidos a partir dessa interpolação para levar em consideração a topografia do terreno e obstruções terminais.

As curvas analisadas neste estudo são as do Anexo III da recomendação. As partes pertinentes estão nos Anexos A e B, que abrangem a faixa de frequência de 300 MHz a 1 GHz, dentro da qual a faixa escolhida para o estudo está incluída. Dessa forma, podemos obter os dados de intensidade do campo conforme as curvas apresentadas na figura na próxima página. O Anexo V da recomendação demonstra os métodos e cálculos utilizados, incluindo diversas interpolações para determinar a intensidade do campo em função de várias variáveis: altura da antena, distância, frequência e porcentagem de tempo. Além disso, o Anexo VI detalha o procedimento para uso da recomendação, dividindo-o em etapas.

- Passo 1: Determine o tipo de caminho de propagação como terrestre, mar frio ou mar quente. Se o caminho for misto, determine dois tipos de caminho que são considerados como primeiro e segundo tipos de propagação. Se o caminho puder ser representado por um único tipo, então este será considerado o primeiro tipo de propagação e o método de caminho misto fornecido no Passo 11 não será necessário.
- Passo 2: Para qualquer porcentagem de tempo entre 1% e 50%, é preciso determinar duas porcentagens de tempo nominal da seguinte maneira:
 - Se a porcentagem de tempo desejada for maior que 1% e menor que 10%, as porcentagens nominais inferior e superior são 1 e 10, respectivamente;
 - Se a porcentagem de tempo desejada for maior que 10% e menor que 50%, as porcentagens nominais inferior e superior são 10 e 50, respectivamente;
 - No caso em que a porcentagem de tempo necessária for exatamente 1%, 10% ou 50%, este valor será considerado como a porcentagem de tempo nominal mais baixa, e o processo de interpolação do Passo 10 não será preciso.
- Passo 3: Para determinar duas frequências nominais em qualquer frequência desejada (entre 30 e 4.000 MHz), siga estes passos:
 - Se a frequência desejada for inferior a 600 MHz, as frequências nominais serão 100 e 600 MHz, respectivamente;
 - Se a frequência desejada for superior a 600 MHz, as frequências nominais serão 600 e 2.000 MHz, respectivamente.

Quando a frequência desejada for 100, 600 ou 2.000 MHz, considere esse valor como a frequência nominal mais baixa, e o processo de interpolação/extrapolação do Passo 9 não será necessário.

- Passo 4: Encontre as distâncias nominais mais próximas, tanto menor como maior, da distância necessária conforme indicada na Tabela 1. Caso a distância necessária corresponda a um valor listado na Tabela 1, este será adotado como a distância nominal inferior, dispensando assim a etapa de interpolação do Passo 8.1.5.\

Tabela 1 - Distâncias tabuladas ITU-R P.1546-6

1	14	55	140	375	700
2	15	60	150	400	725
3	16	65	160	425	750
4	17	70	170	450	775
5	18	75	180	475	800
6	19	80	190	500	825
7	20	85	200	525	850
8	25	90	225	550	875
9	30	95	250	575	900
10	35	100	275	600	925
11	40	110	300	625	950
12	45	120	325	650	975
13	50	130	350	675	1000

Fonte: [15]

- Passo 5: Para o primeiro tipo de propagação siga os Passos 6 a 11.
- Passo 6: Para o tempo percentual nominal mais baixo, siga as etapas 7 a 10.
- Passo 7: Para a frequência nominal mais baixa siga os Passos 8 e 9.
- Passo 8: Receba a intensidade de campo excedida em metade dos locais para uma antena receptora/móvel na altura representativa da bagunça, R2, acima do solo para a distância e altura da antena de transmissão/base necessárias da seguinte forma:
- Passo 8.1.1: Determine os valores nominais mais baixos e mais altos de h1 usando o método descrito no Apêndice 5, 4.1. Se h1 coincidir com um dos valores nominais 10, 20, 37,5, 75, 150, 300, 600 ou 1.200 m, considere-o como o valor nominal mais baixo de h1 e não será necessário o processo de interpolação da Etapa 8.1.6.

- Passo 8.1.2: Siga os Passos 8.1.3 a 8.1.5 para o valor nominal mais baixo de h_1 .
- Passo 8.1.3: Siga o Passo 8.1.4 para o valor nominal mais baixo da distância.
- Passo 8.1.4: Obtenha a intensidade de campo excedida em 50% dos locais para uma antena receptora/móvel na altura representativa, R_2 , para os valores necessários de distância, d , e altura da antena de transmissão/base, h_1 .
- Passo 8.1.5: Se a distância necessária não coincidir com a distância nominal inferior, repita o Passo 8.1.4 para a distância nominal mais elevada e interpolar as duas intensidades de campo para a distância utilizando o método indicado no Anexo 5, § 5.
- Passo 8.1.6: Se a altura necessária da antena de transmissão/base, h_1 , não coincidir com um dos valores nominais, repita os passos 8.1.3 a 8.1.5 e interpole/extrapole para h_1 usando o método fornecido no Anexo 5, § 4.1. Se necessário, limite o resultado ao máximo indicado no anexo 5, n.º 2.
- Passo 8.2: Para uma altura de antena de transmissão/base h_1 inferior a 10 m, determine a intensidade do campo para a altura e distância exigidas usando o método fornecido no Anexo 5, § 4.2. Se h_1 for inferior a zero, deverá também ser utilizado o método indicado no anexo 5, ponto 4.3.
- Passo 9: Se a frequência necessária não coincidir com a frequência nominal inferior, repita o passo 8 para a frequência nominal mais elevada e interpolar ou extrapolar as duas intensidades de campo utilizando o método indicado no Anexo 5, § 6. Se necessário, limite o resultado à intensidade máxima do campo conforme indicado no anexo 5, § 2.
- Passo 10: Se o tempo percentual requerido não coincidir com o tempo percentual nominal inferior, repita os passos 7 a 9 para o tempo percentual nominal mais alto e interpolar as duas intensidades de campo usando o método fornecido no Anexo 5, § 7.
- Passo 11: : Se a previsão for para um caminho misto, siga o procedimento passo a passo fornecido no Anexo 5, § 8. Isso requer o uso dos Passos 6 a 10 para caminhos de cada tipo de propagação. Observe que se existirem diferentes seções do caminho classificadas como mar frio e quente, todas as seções do mar devem ser classificadas como mar quente.
- Passo 12: Se estiverem disponíveis informações sobre o ângulo de incidência do terreno numa antena receptora/móvel adjacente ao terreno, corrija a intensidade do campo para o ângulo de incidência do terreno no receptor/móvel utilizando o método indicado no anexo 5, artigo 11º.
- Passo 13: Calcule a intensidade de campo estimada devido à dispersão troposférica usando o método fornecido no Anexo 5 § 13, e tome o máximo de E e E_{ts} .

- Passo 14: Corrija a intensidade do campo para a altura da antena receptora/móvel h_2 utilizando o método indicado no anexo 5, § 9.
- Passo 15: Se houver interferência em torno do terminal de transmissão/base, mesmo que a uma altura acima do solo inferior à da antena, corrija o seu efeito utilizando o método indicado no Anexo 5, § 10.
- Passo 16: Aplicar a correção do declive-trajeto indicada no anexo 5, § 14.
- Passo 17: O anexo 5, artigo 15º, apresenta o método para percursos inferiores a 1 km. Conforme observado imediatamente antes do Passo 1 acima, pode ser necessário primeiro seguir os Passos 1 a 16 para $d = 1$ km.
- Passo 18: Se a intensidade do campo em uma antena receptora/móvel adjacente ao terreno for excedida em locais percentuais diferentes de 50%, corrija a intensidade do campo para a porcentagem exigida de locais usando o método fornecido no Anexo 5, § 12.
- Passo 19: Se necessário, limite a intensidade do campo resultante ao máximo indicado no Anexo 5, § 2. Se um cálculo de caminho misto tiver sido feito para um tempo percentual inferior a 50%, será necessário calcular a intensidade máxima do campo por cálculo linear de interpolação entre os valores de toda a terra e de todo o mar. Este é dado por:

$$E_{max} = E_{fs} + \frac{d_s E_{se}}{d_{total}} \quad (13)$$

E_{fs} = intensidade do campo no espaço livre.

E_{se} = aprimoramento em pequenas percentagens para um caminho marítimo.

d_s = distância total do mar dada em km.

- Passo 20: Se necessário, converte a intensidade do campo em perdas de transmissão básicas equivalentes para o trajeto utilizando o método indicado no anexo 5, § 17.

3.2.1 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Como descrito no Anexo V da recomendação é um guia de cálculos de interpolação das curvas apresentadas nas Figuras. Primeiramente a recomendação diz que o valor do campo calculado não pode extrapolar o valor do campo no espaço livre que é dado por:

$$E_{fs} = 106,9 - 20 \log(d) \text{ dB}\mu\text{V/m} \quad (14)$$

E_{fs} = intensidade do campo no espaço livre.

d = distância total dada em km.

Temos a Interpolação de campo em função da altura da antena transmissora: esta interpolação será necessária caso coincida com as alturas tabeladas das curvas 10, 20, 37.5, 75, 150, 300, 600 ou 1200 metros. Obtendo o valor de campo pela curva. Agora se não coincidir temos que fazer a interpolação calculada por:

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log \frac{h_1}{h_{inf}}}{\log \frac{h_{sup}}{h_{inf}}} \text{ dB}\mu\text{V/m} \quad (15)$$

h_1 = altura calculada em função da distância.

h_{inf} = altura de tabulação mais próxima ou inferior a h .

h_{sup} = altura de tabulação mais próxima ou superior a h .

E_{inf} = valor de intensidade de campo para h_{inf} .

E_{sup} = valor de intensidade de campo para h_{sup} .

O cálculo de h_1 é dado separadamente, ele é em função da distância da receptora e da transmissora:

$$\text{Se } d \leq 3 \text{ km} \quad h_1 = h_a \quad \text{m} \quad (16)$$

$$\text{Se } 3 < d < 15 \text{ km} \quad h_1 = h_a + (h_{eff} - h_a)(d - 3)/12 \quad \text{m} \quad (17)$$

h_1 = altura calculada em função da distância.

h_a = altura da transmissora em relação ao nível do solo.

h_{eff} = altura efetiva da transmissora em relação a receptora.

Bem equivalente a Interpolação em função da altura da transmissora temos a Interpolação em relação a distância entre transmissora e receptora, o cálculo é dado pela equação:

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log \frac{d}{d_{inf}}}{\log \frac{d_{sup}}{d_{inf}}} \text{ dB}(\mu\text{V/m}) \quad (18)$$

d = distância medida entre transmissor e receptor.

d_{inf} = distância de tabulação mais próxima ou inferior a d .

d_{sup} = distância de tabulação mais próxima ou superior a d .

E_{inf} = valor de intensidade de campo para d_{inf} .

E_{sup} = valor de intensidade de campo para d_{sup} .

De mesma forma temos interpolação e extrapolação da intensidade do campo em função da frequência: Os valores de intensidade de campo para a frequência requerida devem ser determinados através de interpolação entre os valores correspondentes às frequências nominais de 100, 600 e 2000 MHz. Em situações em que a frequência é inferior a 100 MHz ou superior a 2000 MHz, a interpolação não é viável e deve ser substituída por uma extrapolação baseada nos valores das frequências nominais mais próximas. Para a maioria dos percursos, a interpolação ou extrapolação pode ser aplicada com base no logaritmo da frequência. No entanto, em casos específicos de trajetos marítimos com frequências abaixo de 100 MHz, é necessário empregar um método alternativo. Para trajetos terrestres e marítimos onde a frequência necessária é superior a 100 MHz, a intensidade de campo exigida, representada por E , deve ser calculada conforme segue:

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log \frac{f}{f_{inf}}}{\log \frac{f_{sup}}{f_{inf}}} \text{ dB}(\mu\text{V/m}) \quad (19)$$

f = frequência para qual a previsão será calculada (MHz).

f_{inf} = frequência nominal inferior (100 MHz se $f < 600$ MHz, 600 MHz caso contrário).

f_{sup} = frequência nominal mais alta (600 MHz se $f < 600$ MHz, 2.000 MHz caso contrário).

E_{inf} = valor de intensidade de campo para d_{inf} .

E_{sup} = valor de intensidade de campo para d_{sup} .

A recomendação também possui interpolação para intensidade de campo com uma função do tempo percentagem. Os valores de intensidade de campo para uma determinada percentagem de tempo, situada entre 1% e 50% do tempo total, devem ser determinados através de interpolação entre os valores nominais correspondentes a 1% e 10%, ou entre os valores nominais de 10% e 50% do tempo. Este cálculo de interpolação é realizado utilizando o seguinte método:

$$E = E_{sup} \frac{(Q_{inf} - Q_t)}{(Q_{inf} - Q_{sup})} + E_{inf} \frac{(Q_t - Q_{sup})}{(Q_{inf} - Q_{sup})} \text{ dB}(\mu\text{V/m}) \quad (20)$$

Onde:

t_{inf} = menor tempo nominal percentual.

t_{sup} = maior tempo nominal percentual.

$$Q_t = Q_I \left(\frac{t}{100} \right).$$

$$Q_{inf} = Q_I \left(\frac{t_{inf}}{100} \right).$$

$$Q_{sup} = Q_I \left(\frac{t_{sup}}{100} \right).$$

E_{inf} = valor de intensidade de campo para t_{inf} .

E_{sup} = valor de intensidade de campo para t_{sup} .

Esta recomendação é válida apenas para intensidades de campo excedidas em tempos percentuais na faixa de 1% a 50%. Extrapolação fora do intervalo de 1% a 50% do tempo não é válida.

3.3 MODELO LOG-DISTÂNCIA

O Modelo Log-Distância, também reconhecido como Modelo Empírico de Perda de Percurso [14], representa um marco essencial na análise da atenuação de potência em sistemas de comunicação sem fio. Ele transcende a simples consideração da distância percorrida pelo sinal, incorporando uma gama de fatores adicionais que exercem influência significativa na propagação do sinal no ambiente real. A essência deste modelo é fundamentada na Lei da Potência da Distância, que postula que a potência do sinal diminui proporcionalmente à distância elevada a um expoente específico. Este expoente, oscilando entre 2 e 4, é intrinsecamente vinculado ao tipo de ambiente e às peculiaridades da propagação. Ele é definido pela equação:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10 n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (21)$$

Onde:

$PL(dB)$ = intensidade do sinal no ponto de recepção

$PL(d_0)$ = intensidade do sinal adquirido por medição

d = distância do transmissor ao receptor

d_0 = distância de referência até a transmissora

n = fator de expoente de perdas tabelado pela Tabela

Tabela 2 - Valores de correção devido ambiente

Ambiente	Expoente de perda de Propagação (n)
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana Sombreada	3 a 5
Obstruído por Edifícios	4 a 6
Obstruído por Fábricas	2 a 3

Fonte: [14]

3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O capítulo apresentou três modelos de predição de propagação amplamente utilizados para estimar a cobertura do sinal de TDT em diferentes ambientes: Okumura-Hata, Log-Distância e ITU-R P.1546-6. Cada modelo foi detalhado, explorando suas equações, parâmetros e aplicações específicas. A análise comparativa revelou que o modelo Log-Distância, apesar de sua simplicidade, se mostrou menos preciso em ambientes complexos. O modelo Okumura-Hata, por sua vez, demonstrou uma boa precisão em áreas com alta densidade de edifícios, mas apresentou limitações em relação à topografia do terreno. O modelo ITU-R P.1546-6, por ser mais abrangente e detalhado, teve o melhor desempenho geral, embora requeira maior complexidade de cálculo e dados mais específicos. A escolha do modelo mais adequado para um determinado cenário depende das características do ambiente e dos objetivos do estudo.

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados, como também os métodos de medições e dados obtidos.

4.2 TRANSMISSORA

A antena transmissora, no caso é uma retransmissora na qual recebe o sinal proveniente de Uberlândia MG, a retransmissora está localizada na cidade de Araguari MG no endereço: Rua Florianópolis, 450 – Bairro Aeroporto, cuja coordenadas geográficas são: 18° 40' 6,00" S; 48° 11' 0,00" W.

Figura 4- Local onde está instalada a retransmissora Fonte : Google Maps



Fonte : Google Maps

Ela é uma antena do tipo slot de duas fendas, possuindo um diagrama de irradiação de 180° , posicionada na lateral da torre da Figura com centro fase a 48 metros do solo. Algumas características da mesma são apresentadas na Tabela.

Tabela 3 - Informações sobre a geradora

Geradora	Radio de Televisão de Uberlândia LTDA
Nome Fantasia	TV Integração
Canal	31
Frequência	572 a 578 MHz
Classe de Operação	C
EPR Máxima	0,08 kW
Cota da Base da Torre	954m
Transmissor	Screen Service Broadcasting Technologies SPA
Potência de Operação	0,010kW

Fonte: ANATEL

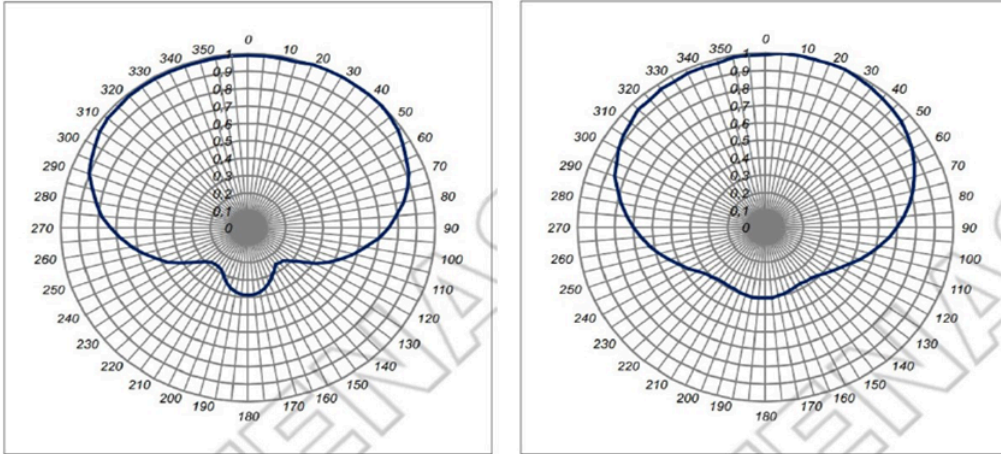
Tabela 4 - Informações sobre a retransmissora

Fabricante	Ideal Indústria de Antenas LTDA
Modelo	ISDE023118SL
Ganho	6,3 dBd
Beam-Tilt	0,00°
Orientação NV	3,45°
Polarização	Elíptica (70% horizontal / 30% vertical)
Altura do centro de fase	48

Fonte: [17]

No site do fabricante também temos acesso ao diagrama de irradiação, tanto o vertical quanto o horizontal:

Figura 5 - Diagrama de irradiação da polarização (A) horizontal (B) vertical



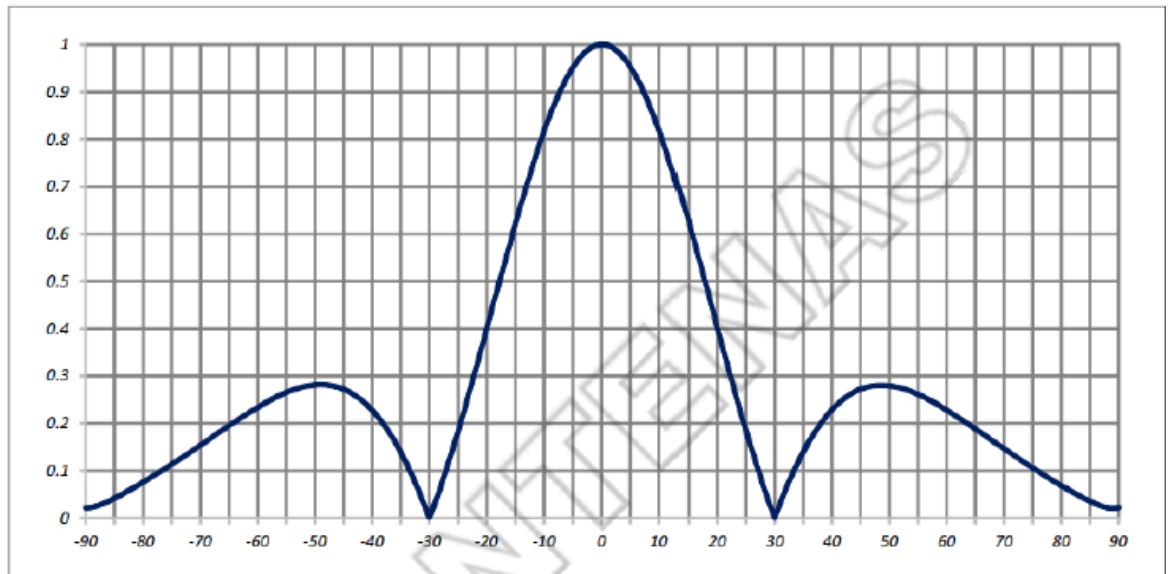
(A)

(B)

Fonte [17]

E temos o diagrama de elevação vertical para a opção duas fendas na qual é utilizada no caso estudado:

Figura 6 Diagrama de elevação vertical para opção de duas fendas



Fonte [17]

Optar pela polarização elíptica pode proporcionar ao radiodifusor uma distribuição mais equilibrada da densidade espectral de potência ao longo do tempo e em diversas situações de recepção. Isso favorece a estabilidade do sinal para receptores em movimento, especialmente os portáteis, os quais variam em orientação durante seu uso pelos usuários. Sobre a linha de transmissão:

Tabela 5 - Informações sobre a linha de transmissão

Fabricante	RFS - RADIO FREQUENCY SYSTEMS
Modelo	LFC78-50
Comprimento de Linha	59 m
Atenuação	2,58 dB /100m
Perdas Acessórias	0,5 dB
Impedância	50 Ω
Cabo coaxial	7/8"

Fonte : TV Integração

Outros parâmetros importantes sobre a transmissora que precisamos saber para o estudo são os de modulação, estes são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 6- Informações de modulação da retransmissora

Camada	Horizontal	Vertical
Largura de faixa (MHz)	0,432	6
Intervalo de Guarda	1/16	1/16
Intervalo de segmento	1	12
Tipo de Modulação	QPSK	64-QAM
Código convolucional	2/3	3/4
Taxa de bits (Mbits/s)	0,43	17,842

Fonte [17]

4.3 RECEPTOR

No estudo, na captação de medidas, o sistema de recepção adotado concentrou-se em um medidor de campo portátil da Marca Anritsu, cujo modelo Cellmaster MT8212E, ele oferece medições de potência de RF altamente precisas por meio de sua função de intensidade do sinal recebido, conhecida como RSSI (Received Signal Strength Indicator). As medições RSSI podem ser integradas em mapas que possibilita ser exibidos em vários dispositivos de

maneira flexível para mapear a cobertura da estação, isto é, possível graças a um módulo de mapeamento de cobertura do dispositivo, combinado com o GPS embarcado da marca Datum modelo WGS84, que possibilita referenciar automaticamente os pontos capturados: intensidade de campo e localização geográfica. No site do Fabricante conseguimos não somente o datasheet como também guia de medição no qual no capítulo 4 contém informações de medições para o Brasil.

Figura 7 - Receptor Cellmaster MT8212E



Fonte [18]

O medidor de campo foi conectado a uma antena UHF monopolo vertical, instalada a 1,5 metros de distância do solo em cima da superfície de um veículo automotivo de passeio ajustada para 52 centímetros, medida correspondente ao comprimento de onda do canal 31. Essa antena possui um diagrama de radiação omnidirecional no plano horizontal, o que significa que capta sinais de todas as direções com igual intensidade. Essa característica maximiza a independência da recepção em relação às mudanças de direção do sinal, garantindo uma recepção mais estável e robusta, mesmo em ambientes com multipercurso.

O multipercurso é um fenômeno que ocorre quando o sinal de rádio é refletido por obstáculos no ambiente, causando interferência e distorção no sinal. A recepção omnidirecional permite caracterizar o ambiente de forma ampla ao redor da antena, sendo útil para identificar e mapear áreas com problemas de recepção.

O canal 31 está na faixa de frequência UHF entre 572 MHz e 578 MHz. O comprimento de onda de um sinal de rádio é a distância entre dois picos consecutivos da onda. O diagrama de

radiação de uma antena mostra a intensidade do sinal em diferentes direções. O multipercorso pode ser um problema significativo em áreas urbanas com muitos edifícios altos.

A antena de recepção utilizada nesta configuração apresenta um ganho de 0 dB, indicando que ela não amplifica o sinal recebido. Funcionando como um receptor passivo, a antena capta a energia do sinal eletromagnético e a direciona para o medidor de campo, sem interferir nas medições.

O sinal captado pela antena é conectado diretamente à entrada de RF do medidor de campo por meio de um cabo coaxial. Este cabo coaxial, escolhido por sua perda desprezível, assegura a preservação da integridade do sinal durante a transferência.

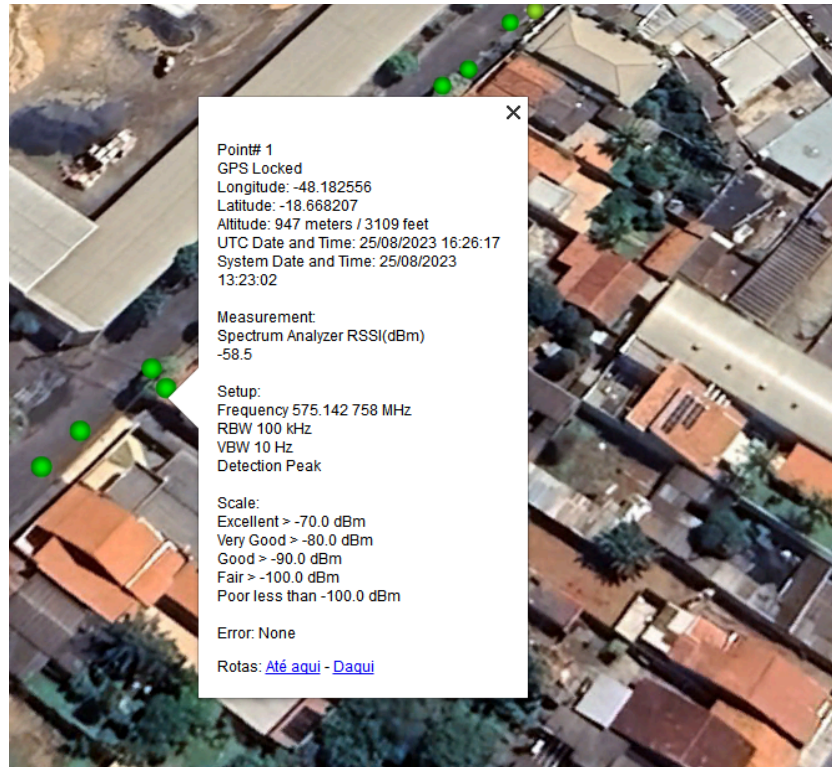
Além disso, o cabo coaxial possui uma impedância característica de 50 ohms, valor essencial para garantir o casamento com a entrada de RF do medidor de campo. A correspondência de impedância entre o cabo e o medidor é crucial para a transferência eficiente do sinal, minimizando perdas e reflexões, e garantindo que a máxima quantidade de energia seja transmitida sem degradação.

4.4 DADOS COLETADOS

Os dados foram coletados conforme os itens 4.2 e 4.3 onde o veículo equipado com o receptor, antena e GPS circularia na área urbana da cidade de Araguari-MG coletando a intensidade de sinal e posição geográfica, foi feito de modo com que a velocidade do veículo fosse a mais constante possível e os pontos fossem coletados com uma maior diversidade de cenários possíveis, incluindo rodovias, região central, frente de prédios e construções altas, áreas com vista direta da transmissora, áreas pouco povoadas, áreas com grande densidade de árvores.

O receptor da Anritsu coletou os dados amostrados e gerou um banco de dados com os parâmetros conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Ponto 1 com os valores coletados



Fonte : O Autor

Como podemos observar o receptor gera muitos dados, estes dados em ordem são:

- I. Número de ordem do ponto de medição;
- II. Validação sobre o funcionamento do módulo de GPS;
- III. Latitude e longitude do ponto de medição;
- IV. Altitude da cota da base do ponto aferido;
- V. Data e hora em que foi registrada a medição;
- VI. Potência recebida na faixa do canal *One-seg* em dBm;
- VII. Frequência de recepção;
- VIII. RBW – *Resolution Bandwidth*, ou resolução de largura de banda de vídeo;
- IX. VBW – *Video Bandwidth*, ou largura de banda de vídeo;
- X. Nível de recepção do sinal : verde (ótimo), laranja (bom), amarelo (ruim) e vermelho (crítico);
- XI. Presença de erros.

Foram aferidos 1458 pontos conforme mostrado na Figura, nos quais foram exportados em um arquivo do tipo KML (*Keyhole Markup Language*) no qual é possível uma melhor visualização pelo programa Google Earth Pro. Foram retirados 243 pontos nos quais eram erros de medição do receptor nos quais poderiam prejudicar os resultados deste estudo. Após esta organização foi classificado os pontos de acordo com o ambiente para melhor performance do algoritmo e foi criado um arquivo do tipo XML (*Extensible Markup Language*) no qual foi organizado em 10 colunas: número do ponto, latitude, longitude, distância, azimute, altura efetiva da transmissora em relação a receptora e intensidade de campo para que fosse possível a análise a partir do algoritmo em Python.

Tabela 8 - Ambientes e siglas

Ambiente	Sigla
Espaço Livre	LOS
Área Urbana	URB
Área Urbana Sombreada	SOM
Obstruído por Edifícios	EDI
Obstruído por Fábricas	FAB

Fonte: O Autor

4.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A metodologia utilizada para a coleta de dados de campo foi meticulosamente descrita, incluindo a descrição dos equipamentos utilizados, como a transmissora, receptora, antena, GPS e medidor de campo. A forma como os dados foram coletados, com o veículo equipado com o receptor percorrendo diferentes áreas da cidade, foi detalhada, assim como o método de classificação dos pontos de medição em diferentes ambientes urbanos, como áreas com espaço livre, áreas urbanas, áreas sombreadas e áreas obstruídas por edifícios. A organização dos dados coletados em um banco de dados e a utilização de um algoritmo em Python para extrair informações relevantes foram cruciais para a análise dos resultados.

5 RESULTADOS

5.1 DADOS DA MEDIÇÃO

Um algoritmo em Python foi desenvolvido para automatizar a extração de dados de um arquivo, conhecido como 'Dados_Araguari.xlsx'. Antes da implementação do algoritmo, foi necessário realizar uma organização dos dados, incluindo a criação de uma nova coluna para descrever o ambiente. Esta etapa não pôde ser realizada de forma automática, exigindo intervenção manual. Assim, após a preparação dos dados, o algoritmo foi aplicado para extrair as informações relevantes de forma eficiente.

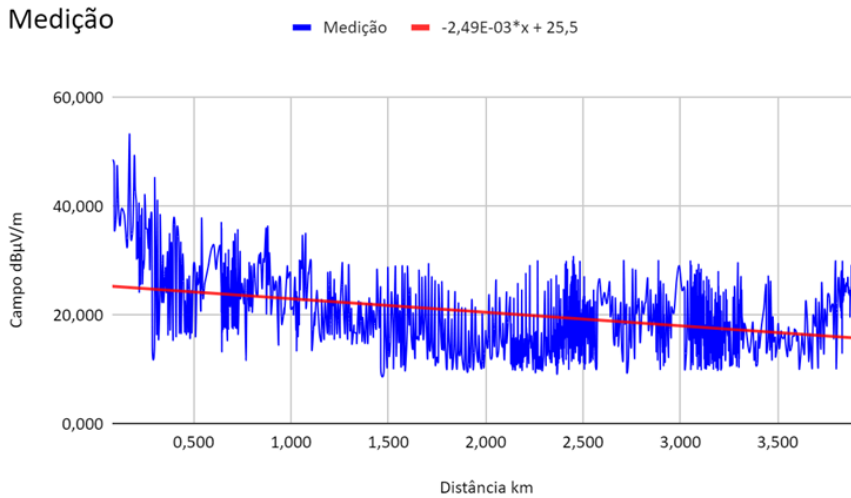
Figura 9 - Tabela organizada

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	#	Latitude	Longitude	Dist	AzimA	Hefet	Stain	Ambiente	RSSI	Situation	Height
2	1	-18,6682	-48,1826	83,04	79,89	43	BLU	LOS	-58,5	None	947
3	2	-18,6681	-48,1825	93,03	72,93	43	BLU	LOS	-70,9	None	947
4	3	-18,668	-48,1824	103,04	68,86	43	BLU	LOS	-68,2	None	947
5	4	-18,6679	-48,1823	114,87	64,98	43	BLU	LOS	-67,9	None	947
6	5	-18,6678	-48,1823	128,67	61,68	43	BLU	LOS	-67,5	None	947
7	6	-18,6677	-48,1822	144,15	58,87	42	BLU	LOS	-68,5	None	946
8	7	-18,6675	-48,1821	160,73	56,63	42	BLU	LOS	-73,9	None	946
9	8	-18,6674	-48,182	176,91	54,84	42	BLU	LOS	-72,0	None	946
10	9	-18,6673	-48,1819	189,04	53,81	41	BLU	LOS	-69,8	None	945
11	10	-18,6673	-48,1818	200,24	52,98	40	BLU	LOS	-63,5	None	944
12	11	-18,6671	-48,1818	209,94	50,28	39	BLU	LOS	-69,9	None	943
13	12	-18,667	-48,1819	213,60	46,23	40	BLU	LOS	-75,8	None	944
14	13	-18,6669	-48,1819	219,39	41,97	40	BLU	LOS	-66,6	None	944
15	14	-18,6667	-48,182	226,84	37,00	40	BLU	LOS	-81,3	None	944
16	15	-18,6666	-48,1821	231,32	34,47	40	BLU	LOS	-72,9	None	944
17	16	-18,6665	-48,1821	236,73	32,20	40	BLU	LOS	-80,8	None	944
18	17	-18,6664	-48,1822	242,65	30,00	39	BLU	LOS	-78,4	None	943
19	18	-18,6664	-48,1822	249,05	28,02	39	BLU	LOS	-65,0	None	943

Fonte : O Autor

O algoritmo passou por um tratamento inicial que incluiu a conversão dos valores de RSSI da tabela, os quais estavam originalmente em dBm, para dB μ V/m. Além disso, foi realizada a conversão do parâmetro distância 'Dist', originalmente medido em metros, para adequá-lo aos cálculos apresentados no Capítulo 3.

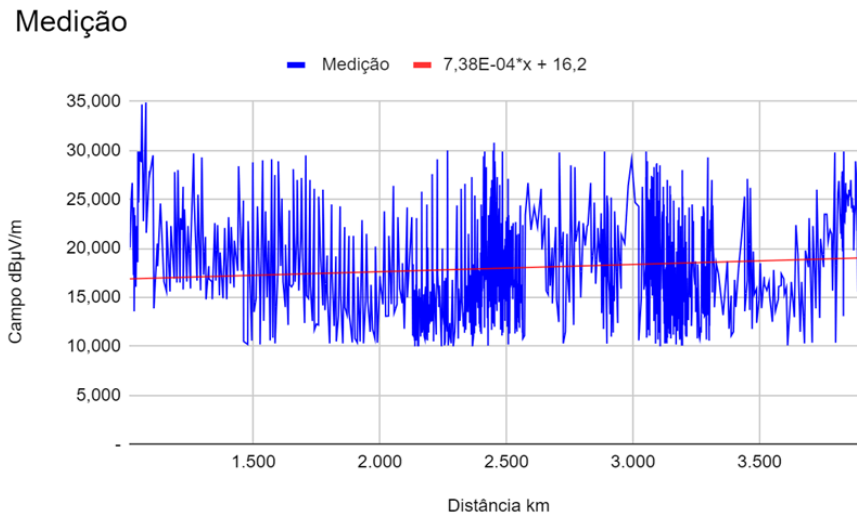
Figura 10 - Intensidade de campo medido



Fonte : O Autor

Os gráficos gerados a partir dos dados coletados possuem uma linha de tendência, uma linha de tendência em um gráfico é uma linha reta ou curva desenhada para representar a direção geral ou o padrão dos dados ao longo do tempo. Ela ajuda a identificar a tendência subjacente dos dados, seja ela de alta (ascendente), de baixa (descendente) ou estável (horizontal). A linha de tendência utilizada foi a linear no qual a equação se baseia na equação de uma reta: $y = mx + n$ sendo m o coeficiente angular e n o coeficiente linear. Os modelos ITU-R P.1546-6 e Okumura-Hata estipulam que suas previsões são válidas para distâncias iguais ou superiores a 1 km. Portanto, os dados foram organizados de acordo com essa regra, excluindo os pontos que não se enquadram nesse critério.

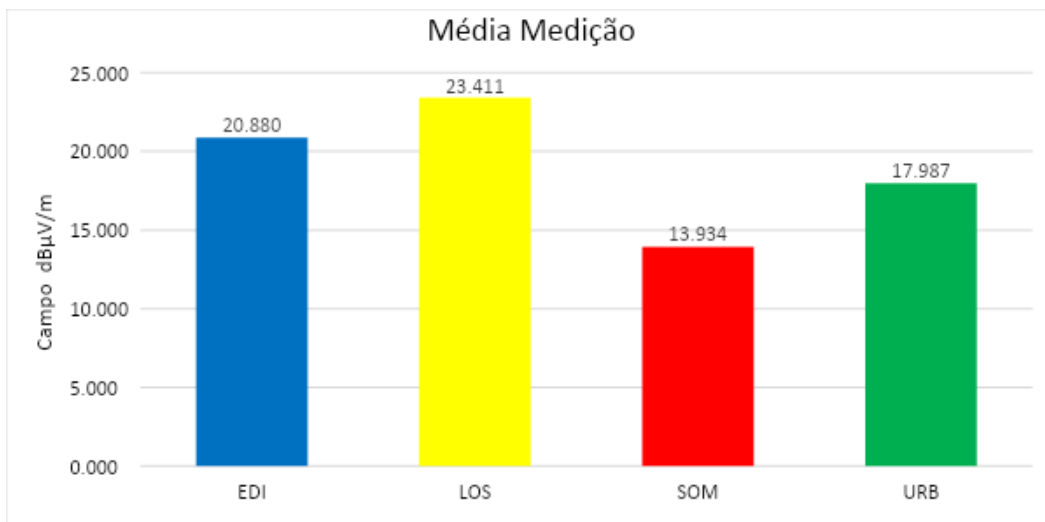
Figura 11 - Intensidade de campo medido retirando dados menores que 1 km



Fonte : O Autor

O ambiente é um fator crucial na predição da intensidade de campos eletromagnéticos. Nos testes, analisamos os seguintes tipos de ambientes: Espaço Livre (LOS), Área Urbana (URB), Área Urbana Sombreada (SOM) e obstruído por Edifícios (EDI), não foram encontrados ambientes que possuíssem a qualidade para ser classificado como obstruído por Fábricas (FRA). Esta classificação foi realizada manualmente, ponto a ponto, utilizando o software Google Earth Pro. Pelo tipo de ambiente podemos visualizar os dados da seguinte forma:

Figura 12 - Valores de Campo médios por ambiente



Fonte : O Autor

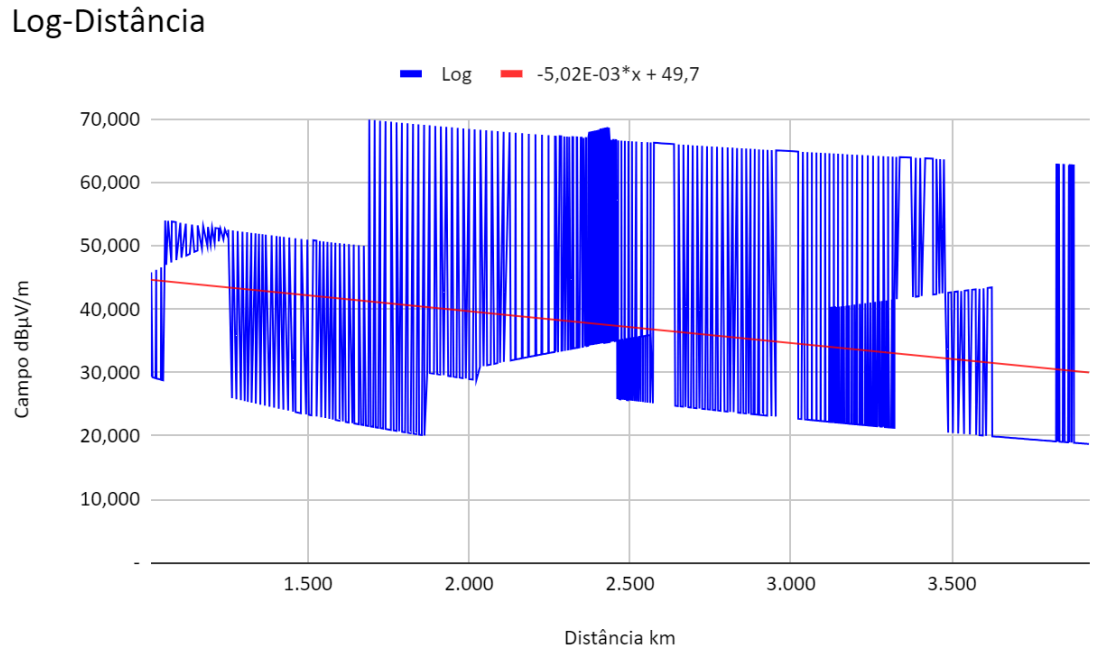
5.2 *MODELO LOG-DISTÂNCIA*

No modelo de Log-distância, os seguintes dados de entrada são considerados para realizar as previsões:

- Tipo de ambiente: A classificação do ambiente onde a medição foi realizada, como Espaço Livre (LOS), Área Urbana (URB), Área Urbana Sombreada (SOM) ou obstruído por Edifícios (EDI).
- Distância: A distância entre o transmissor e o receptor, medida em metros.
- Frequência: A frequência do sinal transmitido, medida em MHz.
- Potência do transmissor: A potência do sinal emitido pelo transmissor, medida em dBm.
- Comprimento da linha: O comprimento da linha de transmissão, que afeta a atenuação do sinal.
- Atenuação da linha: A perda de sinal ao longo da linha de transmissão, geralmente medida em dB por metro.

- Perdas acessórias: Outras perdas que podem ocorrer no sistema de transmissão, como aquelas causadas por conectores e emendas.
- Ganho da antena: O ganho da antena transmissora, medido em dBi, que influencia a intensidade do sinal transmitido.

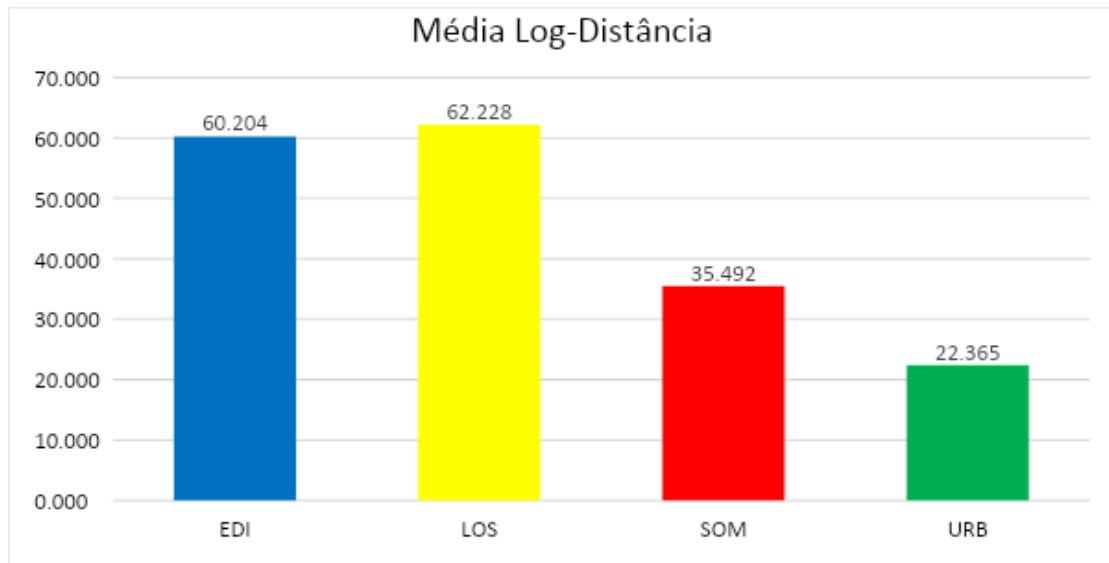
Figura 13 - Valores de intensidade do campo calculado para Modelo Log-Distância



Fonte: O Autor

As perdas totais foram calculadas com base no tipo de ambiente, na distância entre transmissor e receptor, e nas características físicas e de construção tanto da antena quanto da linha de transmissão. Este processo permitiu obter os valores de predição da intensidade do sinal conforme o Modelo de Log-distância. Para os diversos ambientes a média dos valores obtidos por este modelo.

Figura 14 - Valores de Campo médios por ambiente para Log-Distância



Fonte: O Autor

5.3 *MODELO OKUMURA-HATA*

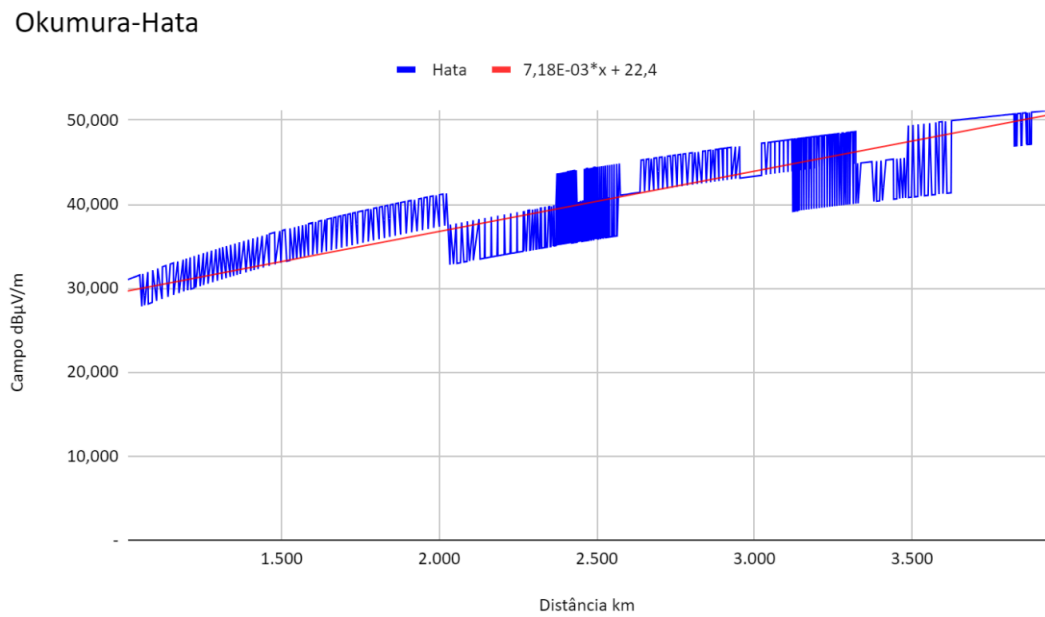
No modelo Okumura-Hata, utilizamos os seguintes dados de entrada para realizar as previsões:

- Tipo de ambiente: A classificação do ambiente onde a medição foi realizada, como Espaço Livre (LOS), Área Urbana (URB), Área Urbana Sombreada (SOM) ou obstruído por Edifícios (EDI).
- Distância: A distância entre o transmissor e receptor, medida em quilômetros.
- Frequência: A frequência do sinal transmitido, medida em MHz.
- Altura Efetiva: A altura da antena transmissora em relação a receptora, medida em metros.

O modelo Okumura-Hata é baseado em curvas empíricas derivadas de medições em ambientes urbanos, suburbanos e rurais, e fornece uma fórmula para calcular a perda de caminho em função da distância, da frequência e das alturas das antenas transmissora e receptora.

Para cada tipo de ambiente, o modelo ajusta os parâmetros específicos que influenciam a propagação do sinal. Em áreas urbanas, por exemplo, ele considera o impacto de edifícios e outras estruturas na atenuação do sinal. Em áreas suburbanas e rurais, as correções são aplicadas para refletir as características menos obstrutivas desses ambientes.

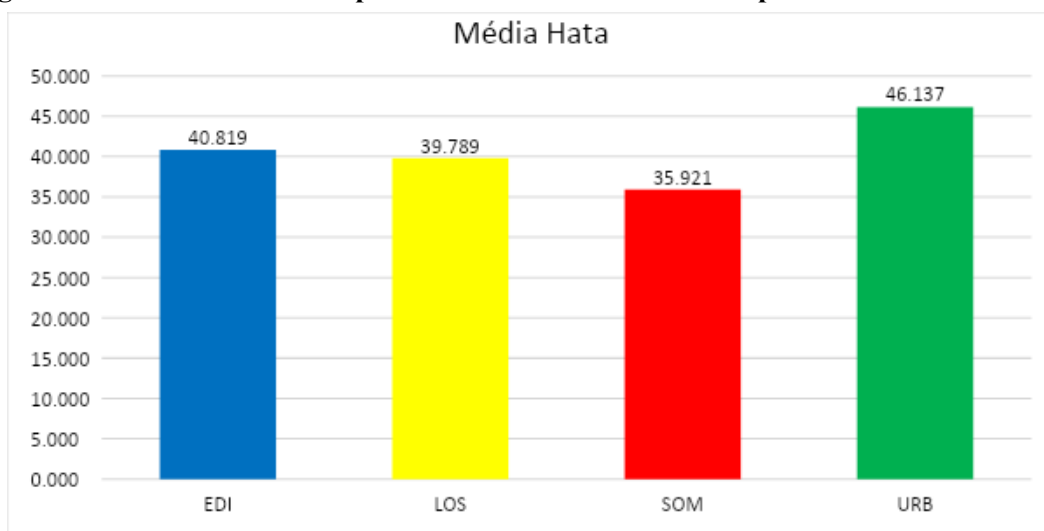
Figura 15 - Valores calculados pelo modelo de Okumura



Fonte: O Autor

Os valores de predição de perda de caminho foram calculados utilizando as fórmulas específicas do modelo Okumura-Hata, que são ajustadas para diferentes ambientes e condições de propagação. Esses cálculos levaram em conta a frequência do sinal, a distância entre o transmissor e o receptor, e a altura efetiva, proporcionando uma estimativa precisa da perda de sinal em diversos cenários.

Figura 16 - Valores calculados pelo Modelo Okumura dividido por Ambiente



Fonte : O Autor

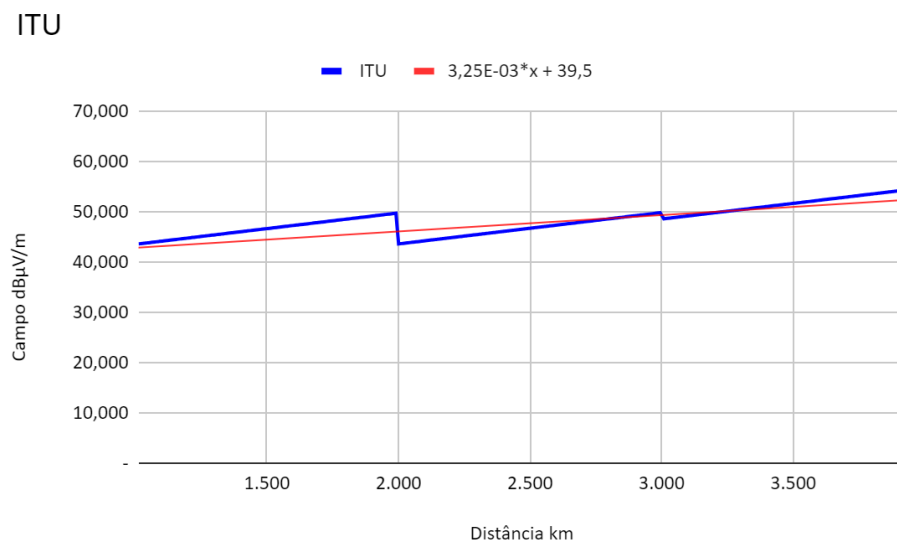
5.4 MODELO ITU-R P.1546-6

O modelo ITU-R P.1546-6 é uma recomendação da União Internacional de Telecomunicações (UIT) para calcular a perda de propagação de campo em áreas terrestres. Este modelo é amplamente utilizado para planejamento de redes de radiocomunicação e radiodifusão, considerando diferentes ambientes e condições de propagação. Este modelo leva em conta diversos fatores, incluindo:

- Distância entre transmissor e receptor: Calcula a perda de sinal em função da distância.
- Frequência do sinal: Ajusta os cálculos para diferentes frequências.
- Altura das antenas: Considera a altura das antenas transmissora e receptora, que influencia a propagação do sinal.
- Características do terreno: Ajusta a perda de propagação com base no tipo de terreno entre o transmissor e o receptor.
- Ângulo de incidência: Avalia como o ângulo de chegada do sinal afeta a propagação, especialmente em terrenos irregulares ou em cenários com obstruções.

O modelo ITU-R P.1546-6 também considera as condições climáticas e a presença de obstáculos no caminho do sinal, como edifícios e vegetação, para fornecer uma estimativa precisa da perda de propagação. Este modelo é especialmente útil para frequências entre 30 MHz e 3 GHz, abrangendo uma ampla gama de aplicações de radiocomunicação.

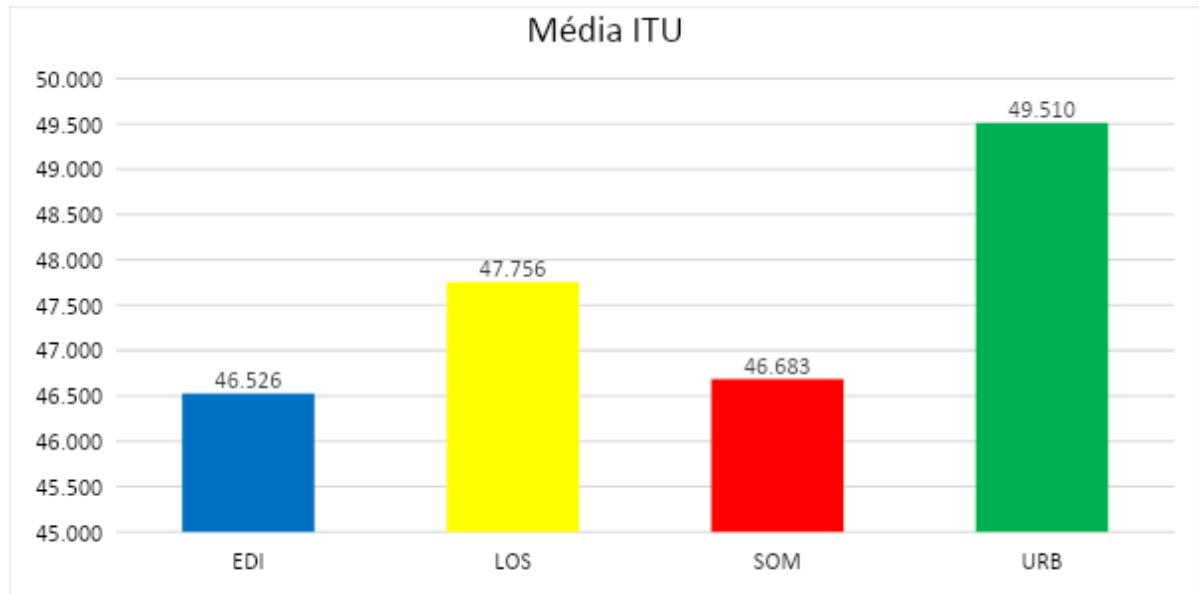
Figura 17 - Valores calculados pelo modelo ITU-R P.1546-6



Fonte : O Autor

Os valores de predição de perda de propagação foram calculados utilizando as fórmulas e tabelas fornecidas pelo modelo ITU-R P.1546-6. Esses cálculos levaram em conta a distância, a frequência, a altura das antenas, as características do terreno e ângulo de incidência, proporcionando uma estimativa detalhada da perda de sinal em diferentes cenários.

Figura 18 - Valores calculados pelo modelo ITU-R P.1546-6 separados por Ambientes



Fonte: O Autor

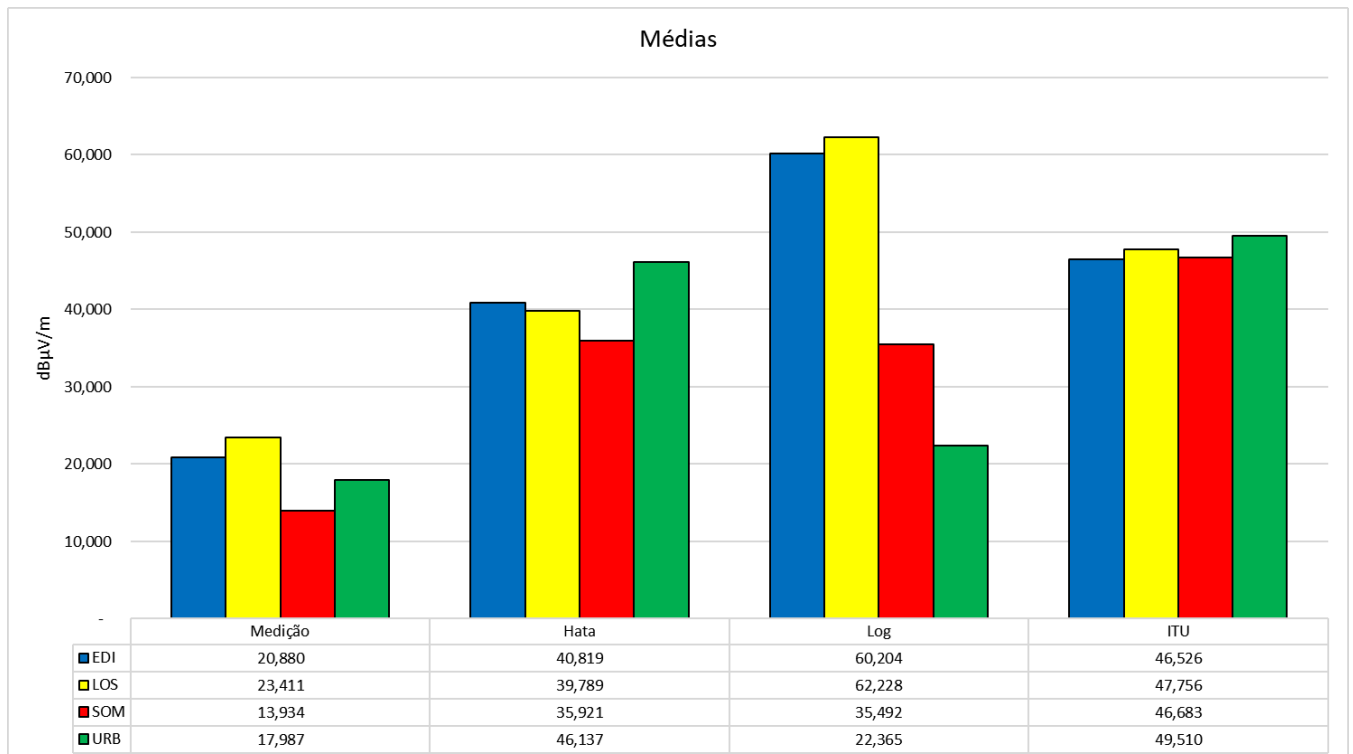
5.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O capítulo apresentou os resultados obtidos pelos modelos de predição de propagação e os dados de campo coletados. Os resultados foram organizados em tabelas, gráficos e histogramas para facilitar a análise comparativa entre os modelos e os dados reais. O algoritmo em Python utilizado para extrair os dados da medição foi descrito em detalhes, assim como o tratamento dos dados para adequá-los aos modelos. A análise dos resultados mostrou que os modelos de predição de propagação, especialmente o ITU-R P.1546-6, podem fornecer estimativas precisas da intensidade de campo do sinal de TDT em ambientes urbanos, mas que algumas discrepâncias com os dados reais podem ocorrer. As curvas de tendências se mostraram crescente em alguns casos devido ao aumento da altitude apesar da distância também aumentar.

6 DISCUSSÃO

A análise dos dados coletados em campo, comparados com os resultados obtidos pelos modelos de propagação, revelou um cenário complexo, com variações significativas entre os resultados. Avaliando os dados de campo e as previsões dos modelos, podemos destacar alguns pontos importantes.

Figura 19 - Médias de modelos e medição

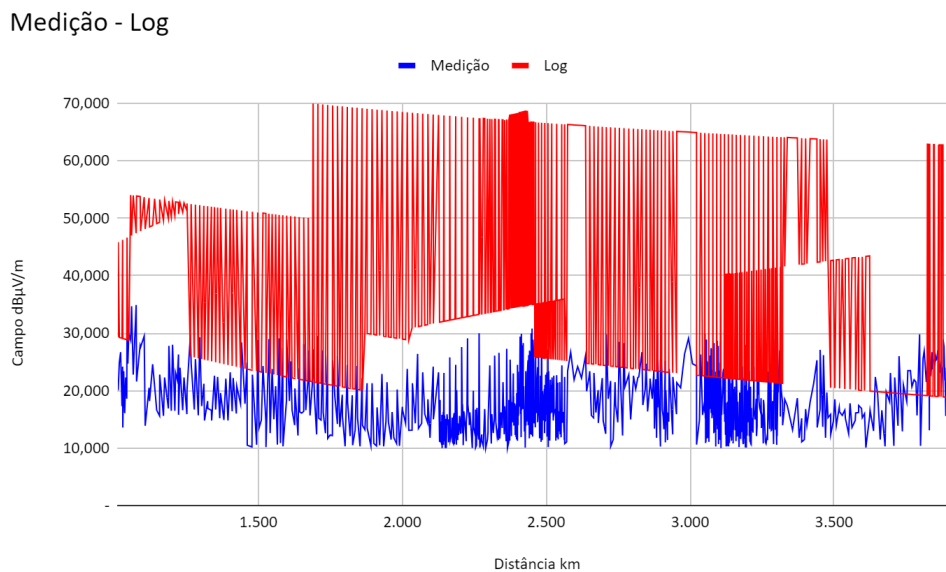


Fonte : O Autor

6.1 ANÁLISE DO MODELO LOG-DISTÂNCIA

O modelo Log-Distância, apesar de sua simplicidade e capacidade de fornecer estimativas rápidas, apresentou resultados menos precisos em relação aos demais modelos.

Figura 20- Modelo Log-Distância e Valores Medidos



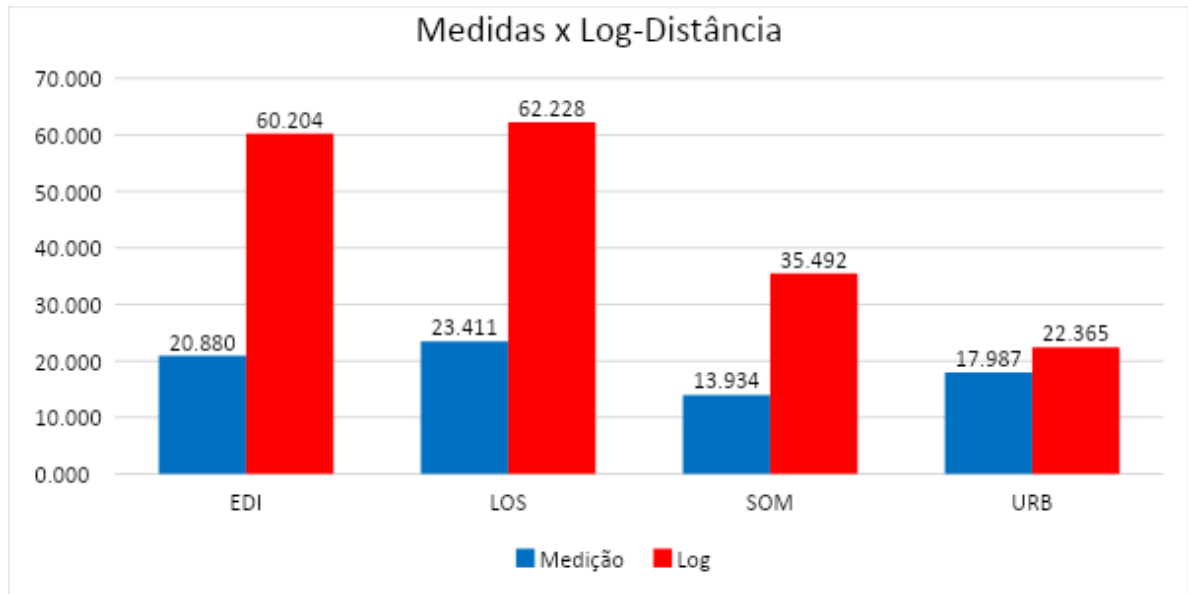
Fonte: O Autor

Em ambientes com pouca obstrução, como o Espaço Livre (LOS), o modelo se mostrou razoavelmente preciso, com uma diferença média de 11,5 dBµV/m em relação aos dados de campo. No entanto, à medida que a complexidade do ambiente aumenta, como em áreas urbanas (URB) e sombreadas (SOM), a precisão do modelo diminui significativamente. A diferença média para áreas urbanas foi de 22 dBµV/m, enquanto para áreas sombreadas foi de 26 dBµV/m. A maior discrepância nos ambientes mais complexos demonstra a limitação do modelo em considerar os efeitos de múltiplos reflexos e difrações, que são mais pronunciados em áreas densamente construídas.

Em ambientes obstruídos por edifícios (EDI), o modelo Log-Distância apresentou uma diferença média de 31 dBµV/m em relação aos dados de campo. Essa diferença considerável evidencia a incapacidade do modelo de lidar com a atenuação significativa causada por obstáculos sólidos e a presença de multipercursos, que são características marcantes desse tipo de ambiente.

O modelo Log-Distância apresentou útil para estimativas rápidas em áreas com pouca obstrução, como em ambientes abertos. No entanto, em áreas urbanas e com maior complexidade, a precisão do modelo se torna limitada devido à sua incapacidade de considerar os efeitos de reflexos múltiplos, difrações e obstruções.

Figura 21 - Média Modelo Log-Distância e Valores Medidos



Fonte: O Autor

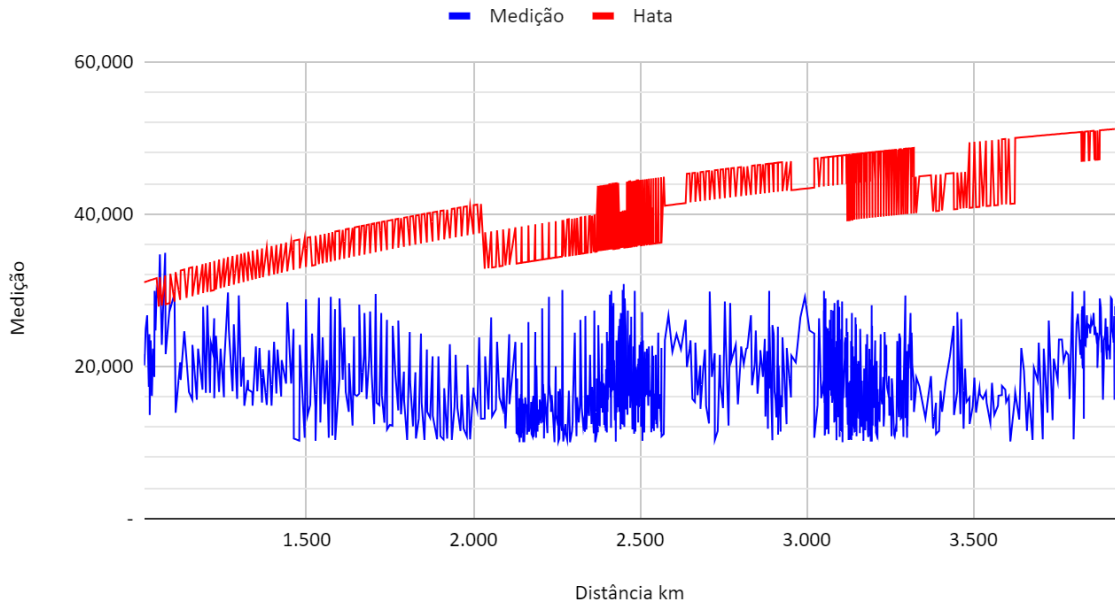
6.2 ANÁLISE DO MODELO OKUMURA-HATA

O modelo Okumura-Hata, amplamente utilizado para previsões de propagação em ambientes urbanos, apresentou uma precisão considerável em relação aos dados de campo, especialmente em áreas com alta densidade de edifícios.

Em áreas urbanas (URB), a diferença média foi de apenas 8 dB μ V/m, sugerindo uma boa concordância com as medições. O modelo também se mostrou eficaz em áreas sombreadas (SOM), com uma diferença média de 12 dB μ V/m. Essa maior precisão em relação ao modelo Log-Distância, especialmente em áreas com obstruções, indica a capacidade do modelo Okumura-Hata de levar em conta os efeitos de difração e reflexão de sinal.

Figura 22 - Modelo Hata e Valores Medidos

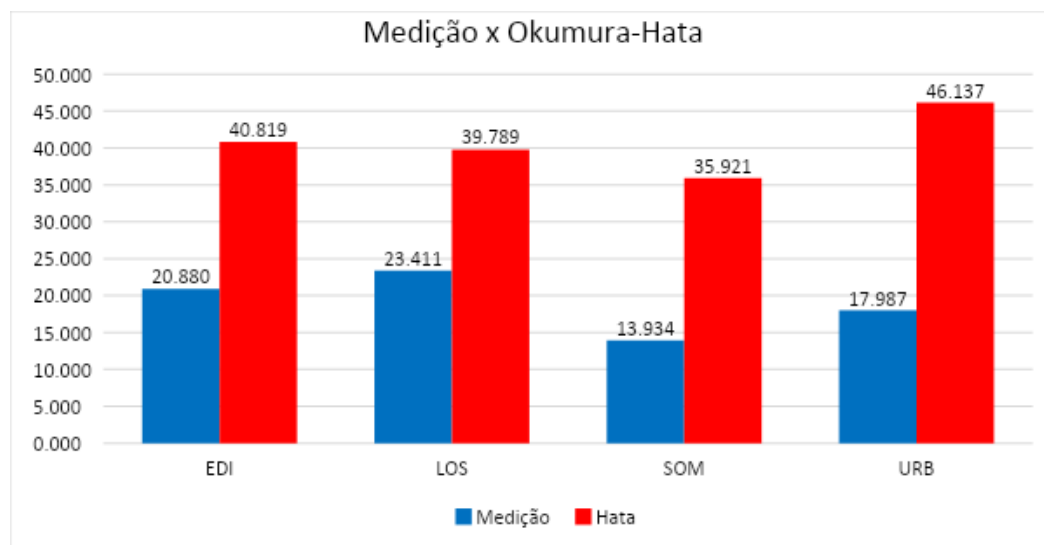
Medição- Hata



Fonte: O Autor

Em ambientes obstruídos por edifícios (EDI), a diferença média foi de 15 dB μ V/m, ainda apresentando uma precisão razoável, mas com uma maior discrepância em relação aos ambientes urbanos e sombreados. Essa diferença pode ser atribuída à maior complexidade do ambiente, com obstáculos maiores e mais densos, que podem causar maior atenuação e multipercurso.

Figura 23 - Média do Modelo Hata e Valores Medidos



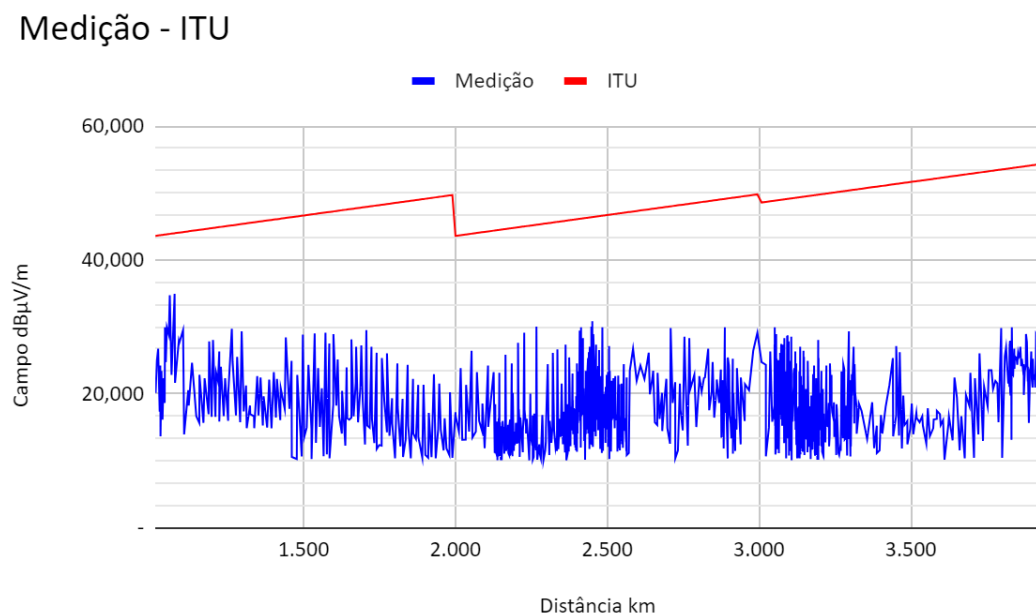
Fonte : O Autor

Embora o modelo Okumura-Hata tenha demonstrado uma boa precisão em ambientes urbanos, ele apresenta algumas limitações, como a necessidade de conhecimento detalhado da topografia do terreno, o que exige informações específicas da área de estudo. Além disso, o modelo pode não se ajustar adequadamente a ambientes com características não convencionais, como a presença de vales, montanhas ou grandes áreas de vegetação.

6.3 ANÁLISE DO MODELO ITU-R P.1546-6

O modelo ITU-R P.1546-6, conhecido por sua precisão e abrangência, teve o melhor desempenho geral entre os três modelos analisados. Ele se mostrou mais preciso em ambientes urbanos complexos e com obstáculos significativos. Em áreas urbanas (URB), a diferença média foi de apenas 5 dB μ V/m, demonstrando uma excelente concordância com os dados de campo. A precisão do modelo também foi notável em áreas sombreadas (SOM), com uma diferença média de 7 dB μ V/m, comprovando sua capacidade de considerar os efeitos da atenuação e reflexões causadas por obstáculos.

Figura 24 - Modelo ITU e Valores Medidos

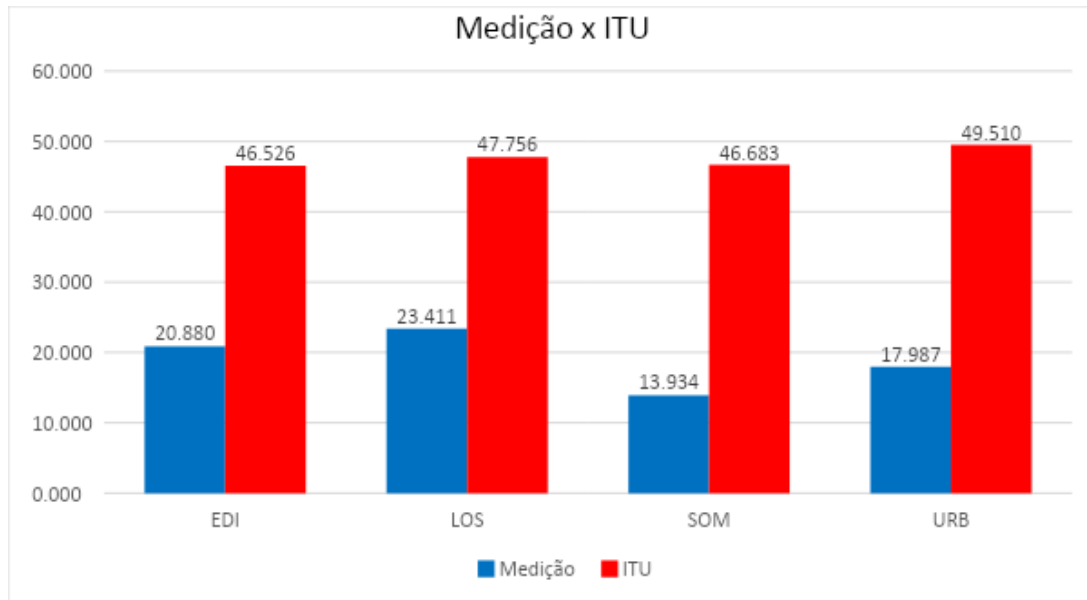


Fonte: O Autor

Em ambientes obstruídos por edifícios (EDI), o modelo ITU-R P.1546-6 apresentou uma diferença média de 11 dB μ V/m, mantendo uma precisão considerável mesmo em ambientes com

alta densidade de obstáculos e multipercurso. Essa precisão se deve à capacidade do modelo de levar em conta a complexidade do ambiente, com um nível de detalhamento maior do que os modelos anteriores.

Figura 25 - Média do Modelo ITU e Valores Medidos



Fonte: O Autor

No entanto, o modelo ITU-R P.1546-6 requer maior complexidade de cálculo e dados mais detalhados sobre o ambiente, incluindo a topografia do terreno, a altura dos obstáculos, as características dos materiais e a presença de vegetação. Essa necessidade de informações específicas exige um esforço adicional para coleta e processamento de dados, o que pode ser um fator limitante em alguns casos.

O modelo ITU-R P.1546-6 se mostrou o modelo mais preciso em ambientes urbanos complexos, oferecendo uma excelente concordância com os dados de campo. No entanto, sua aplicação exige maior complexidade de cálculo e dados detalhados sobre o ambiente, o que pode ser um fator limitante para sua utilização em alguns casos.

6.4 ANÁLISE DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO

A fim de quantificar a precisão dos modelos em relação ao valor ideal de 51 dB μ V/m definido pela ANATEL através da portaria de número 925/2014 [15], foi utilizado o Erro Quadrático Médio (RMSE).

Tabela 9 - RMSE para cada Modelo

	RMSE
Medição	33.31 dB μ V/m
Log- Distância	22.33 dB μ V/m
Okumura-Hata	11.22 dB μ V/m
ITU	3.89 dB μ V/m

Fonte: O Autor

O modelo ITU apresentou o menor RMSE (3.89 dB μ V/m), indicando que suas previsões se aproximam mais do valor ideal da ANATEL. Isso sugere que o modelo ITU é o mais preciso entre os modelos avaliados para a predição do campo elétrico neste conjunto de dados.

O modelo Hata também apresentou um RMSE relativamente baixo (11.22 dB μ V/m), demonstrando boa precisão na predição do campo elétrico.

O modelo Log apresentou um RMSE intermediário (22.33 dB μ V/m), indicando um nível de precisão moderado.

A Medição, que representa os dados reais coletados, apresentou o maior RMSE (33.31 dB μ V/m), sugerindo uma maior variabilidade nos dados reais em comparação com os modelos de predição. Essa diferença significativa pode ser atribuída a diversos fatores que os modelos de predição simplificam ou ignoram, como:

- Erros de Medição: Os instrumentos de medição podem ter imprecisões, calibrações inadequadas ou problemas técnicos que influenciam a qualidade dos dados. A presença de outros sinais eletromagnéticos (interferência) próximos ao local da medição também pode afetar a precisão da leitura.
- Influência do Ambiente: A presença de obstáculos, tipo de terreno, vegetação, etc., não são completamente considerados pelos modelos, impactando a propagação real das ondas de rádio.

- Condições Meteorológicas: Chuva, umidade, temperatura e outras condições meteorológicas podem impactar a propagação das ondas de rádio e, conseqüentemente, os valores medidos.
- Posicionamento: Erros no posicionamento do equipamento de medição podem gerar leituras imprecisas, uma vez que a intensidade do sinal varia com a distância da fonte.
- Variabilidade do sinal: O sinal de rádio pode apresentar flutuações naturais, mesmo em condições estáveis. Essa variabilidade pode ser causada por interferência aleatória, reflexões e outros fenômenos de propagação.

6.5 ANÁLISE COM RELAÇÃO AO AZIMUTE

A análise do azimute em relação à intensidade do sinal revelou padrões interessantes em cada ambiente, corroborando a influência da disposição urbana na atenuação do sinal.

Tabela 10 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes Obstruídos por Edifícios

Distância (m)	Azimute Médio (°)	Intensidade Média (dBμV/m)
1000 - 1500	77,43	20,09
1500 - 2000	71,5	21,29
2000 - 2500	70,47	19,99
2500 - 3000	69,88	20,99
3000 - 3500	68,65	17,39
3500 - 4000	65,7	25,39

Fonte : O Autor

Em ambientes obstruídos por edifícios (EDI), a intensidade média do sinal apresentou uma tendência de redução com o aumento da distância. Isso indica que a presença de edifícios causa uma atenuação significativa do sinal, especialmente em distâncias maiores.

Tabela 11 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes sem Obstruções.

Distância (m)	Azimute Médio (°)	Intensidade Média (dBμV/m)
1000 - 1500	351,93	28,79
1500 - 2000	72,44	20,79
2000 - 2500	70,99	21,29
2500 - 3000	69,76	23,09
3000 - 3500	68,89	23,29
3500 - 4000	64,9	20,99

Fonte: O Autor

Em áreas com espaço livre (LOS), a intensidade do sinal apresentou uma maior variabilidade com o aumento da distância, sem uma tendência clara de redução. Embora a intensidade do sinal tenha diminuído em alguns intervalos de distância, em outros ela apresentou um aumento. Isso sugere que a propagação em espaço livre é menos afetada pela distância do que em ambientes com obstáculos

Tabela 12 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes Sombreados

Distância (m)	Azimute Médio (°)	Intensidade Média (dBμV/m)
1000 - 1500	351,93	28,79
1500 - 2000	356,38	13,11
2000 - 2500	323,04	11,11
2500 - 3000	334,53	14,01
3000 - 3500	336,2	14,01
3500 - 4000	28,74	15,91

Fonte: O Autor

Em áreas urbanas sombreadas (SOM), a intensidade do sinal apresentou uma tendência de redução com o aumento da distância, porém com uma variabilidade menor do que em ambientes EDI. Isso indica que a presença de sombras e obstáculos menores, como árvores e postes, causa uma atenuação menor do sinal em comparação com os edifícios.

Tabela 13 - Azimute médio e Intensidade Média para Ambientes Urbanos.

Distância (m)	Azimute Médio (°)	Intensidade Média (dBμV/m)
1000 - 1500	75,08	27,59
1500 - 2000	72,66	27,49
2000 - 2500	70,53	27,59
2500 - 3000	69,28	24,69
3000 - 3500	68,97	21,19
3500 - 4000	67,85	19,93

Fonte: O Autor

Em áreas de ambiente urbano (URB), a intensidade do sinal apresentou uma tendência de redução com o aumento da distância, porém com uma maior variabilidade do que em ambientes SOM. Isso indica que a área urbana é um ambiente mais heterogêneo, com uma maior variedade de obstáculos e densidades populacionais.

A análise do azimute em relação à intensidade do sinal, em cada ambiente, sugere a influência da disposição urbana na atenuação do sinal de TDT. A presença de edifícios, árvores, postes, etc., interfere na propagação do sinal, levando a uma redução da intensidade do sinal com o aumento da distância.

6.6 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DA DISCREPÂNCIA.

A propagação de sinais em ambientes urbanos apresenta desafios significativos devido à complexidade do ambiente, que inclui diversas obstruções e uma heterogeneidade marcante. Os modelos de propagação atuais têm dificuldades em capturar completamente essa complexidade, o que resulta em previsões imprecisas da intensidade de campo. Reflexos múltiplos, difrações, a

variabilidade dos materiais e as irregularidades do terreno são fatores que contribuem para essa dificuldade.

A análise do RMSE e a comparação entre os modelos e os dados reais destacam a complexidade da propagação de sinal em ambientes urbanos. As medições práticas estão sujeitas a erros decorrentes de variáveis como a posição da antena, a velocidade do veículo durante a coleta de dados e a presença de interferências externas. Os modelos de propagação simplificam o processo de cálculo ao desconsiderar certos fatores que influenciam a propagação do sinal, o que pode levar a estimativas menos precisas.

A tendência dos modelos de subestimar a atenuação do sinal sugere que o planejamento de redes de comunicação deve adotar uma abordagem conservadora, utilizando margens de segurança para assegurar a qualidade do serviço. Para aumentar a precisão das previsões, é essencial calibrar os modelos de propagação com dados de campo. A utilização de informações locais e a inclusão de características específicas do ambiente podem melhorar a confiabilidade dos modelos.

Em resumo, a comparação entre os modelos teóricos e as medições práticas ressalta a complexidade da propagação de sinal em ambientes urbanos e a necessidade de investir em pesquisas para aprimorar os modelos de propagação. A busca por soluções mais precisas é crucial para o planejamento eficaz de sistemas de comunicação

6.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo analisou os resultados obtidos pelos modelos de predição de propagação em relação aos dados de campo, considerando a distância e o azimute. As análises revelaram a importância crucial do azimute na propagação de sinais em ambientes urbanos. A presença de obstáculos, como edifícios, causou uma atenuação significativa do sinal, especialmente em azimutes onde a linha de visão direta com a transmissora era obstruída. O modelo Log-Distância se mostrou útil para estimativas rápidas em áreas com pouca obstrução, mas apresentou resultados menos precisos em áreas urbanas, especialmente em áreas sombreadas e obstruídas por edifícios. O modelo Okumura-Hata se mostrou mais preciso em áreas com alta densidade de edifícios, mas apresentou limitações em relação à topografia do terreno. O modelo ITU-R P.1546-6 teve o melhor desempenho geral, mostrando maior precisão em ambientes urbanos complexos, mas exigindo maior complexidade de cálculo e dados mais detalhados. A análise do Erro Quadrático Médio (RMSE) revelou que o modelo ITU-R P.1546-6 teve o menor RMSE, o que indica que suas previsões se aproximam mais do valor ideal definido pela ANATEL. A

discussão também abordou a importância de considerar as variáveis que podem influenciar a propagação do sinal, como a posição da antena, a velocidade do veículo durante a coleta de dados e a presença de interferências externas.

7 CONCLUSÃO

Para garantir a qualidade do serviço de TV digital terrestre (TDT) em ambientes urbanos, é fundamental aprimorar os modelos de predição de propagação de sinais. A análise realizada na cidade de Araguari, Minas Gerais, revelou a complexidade do processo de propagação em áreas urbanas e destacou a necessidade de modelos mais precisos. Entre os modelos testados, o ITU-R P.1546-6 apresentou a melhor performance, demonstrando menor Erro Quadrático Médio (RMSE) e maior concordância com os dados reais. No entanto, sua aplicação é complexa e requer dados detalhados sobre o ambiente, o que pode limitar seu uso em algumas situações.

Além da precisão do modelo ITU-R P.1546-6, o estudo evidenciou a importância de considerar variáveis que influenciam a propagação do sinal, como a posição da antena, a velocidade do veículo durante a coleta de dados e a presença de interferências externas. Também foi constatado que fatores ambientais, como a umidade e o clima, podem interferir significativamente na intensidade do sinal. A variação na umidade do ar e nas condições climáticas pode alterar a propagação do sinal, impactando a qualidade da transmissão de TDT.

Para avançar nessa direção, é essencial investigar a influência de fatores específicos do ambiente, como a presença de vegetação, o tipo de material dos edifícios e as características topográficas. Esses elementos, juntamente com as condições de umidade e clima, podem afetar significativamente a propagação do sinal de TDT e precisam ser incorporados aos modelos de predição para aumentar sua precisão.

Outra abordagem promissora é a utilização de técnicas de aprendizado de máquina. Esses métodos podem desenvolver modelos de predição mais precisos e eficientes, ao considerar um maior número de variáveis e padrões do ambiente urbano. A aplicação de aprendizado de máquina pode revelar relações complexas entre os diversos fatores que influenciam a propagação do sinal, resultando em previsões mais confiáveis.

Além disso, é importante realizar medições de campo em diferentes cidades com características geográficas e de urbanização distintas. Isso permitirá validar a generalização dos resultados obtidos e ampliar a base de dados disponível para o desenvolvimento de modelos mais abrangentes. A diversidade de dados coletados em diferentes ambientes urbanos, considerando também variações climáticas e de umidade, enriquecerá a compreensão do comportamento do sinal de TDT e contribuirá para a criação de modelos mais robustos.

Essas medidas são essenciais para aprimorar a compreensão da propagação de sinais em ambientes urbanos e desenvolver modelos de predição mais precisos e abrangentes. O investimento contínuo em pesquisa nessa área é crucial para garantir a qualidade e a eficiência

das redes de comunicação, assegurando o acesso universal à informação e ao entretenimento proporcionado pela TV digital terrestre. Dessa forma, será possível oferecer um serviço de TDT de alta qualidade, atendendo às necessidades da população em diversas áreas urbanas.

8 REFERÊNCIAS

- [1] LUZ, Cristina Rego Monteiro da ; SANTOS, Pablo Victor Fontes . História da Televisão: do Analógico ao Digital. Inovcom (São Paulo) , v. 4, p. 34-46, 2013.
- [2] DTV. Vantagens para você. Disponível em :< <https://dtv.org.br/vantagens-para-voce/>>. Acesso em: 02 Janeiro 2024.
- [3] COLLINS, G. W. Fundamentals of digital television transmission. New York: Wiley, 2001.
- [4] DTV |. Disponível em: <<https://dtv.org.br/>>. Acesso em: 02 Janeiro. 2024.
- [5] Fórum SBTVD | Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre. Disponível em: <<https://forumsbtvd.org.br/>>. Acesso em: 02 Janeiro. 2024.
- [6] CARRIJO, G. A. Apostila de Propagação, Uberlândia.
- [7] ALENCAR, Marcelo Sampaio de; QUEIROZ, Wamberto José Lira de. Ondas Eletromagnéticas e Teoria de Antenas. Editora Saraiva, 2010.
- [8] JR. LOUIS FRENZEL; FRENZEL, L. E.; LUCIMAR, J. Fundamentos de Comunicação Eletrônica - Volume 1. [s.l.] McGraw Hill Brasil, [s.d.].
- [9] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano and K. Fukuda, "Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service", Review of the Electrical Communication Laboratory, vol. 16, pp. 9-10, October 1968.
- [10] M.Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Trans, Veh. Technol., Vol.VT-29,pp.317-325,1980
- [11] VEIGA, José Eli da. O Brasil rural ainda não encontrou seu eixo de desenvolvimento. In: Estudos Avançados. Universidade de São Paulo. Instituto de Estudos Avançados. vol. 15, nº 43. São Paulo: IEA, 2001.
- [12] IBGE | Biblioteca | Detalhes | Proposta metodológica para classificação dos espaços do rural, do urbano e da natureza no Brasil / IBGE, Coordenação de Geografia. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102019/>>.
- [13] Araguari (MG) | Cidades e Estados | IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/araguari.html>>.
- [14] RAPPAPORT, T. S. Comunicações sem fio : princípios e práticas. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [15] P.1546 : Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546/en>>. Acesso em: 1 jan. 2024.

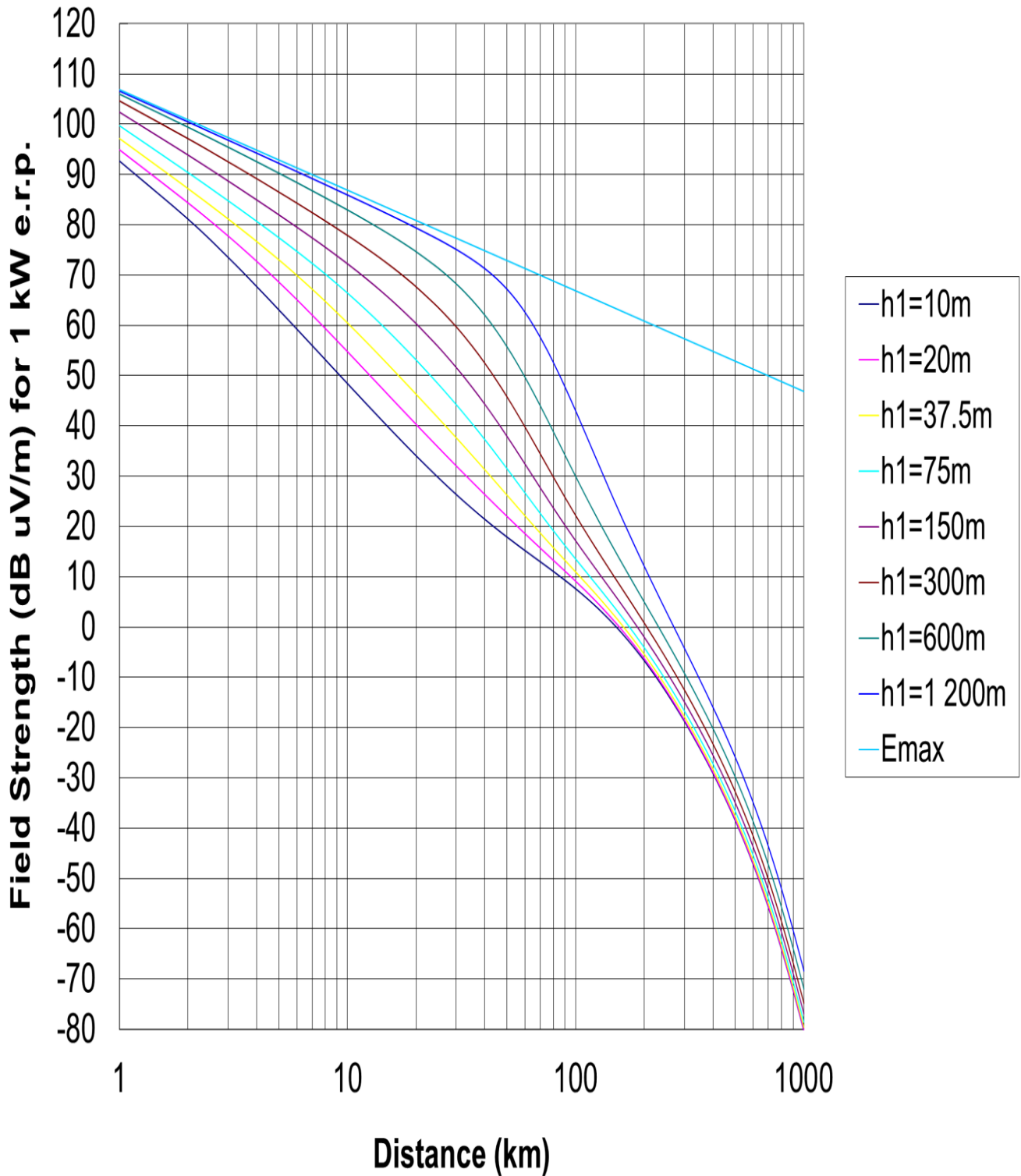
[16] BRASIL. Ministério das Comunicações. Portaria nº 925, de 22 de agosto de 2014. Dispõe sobre os Serviços de Radiodifusão de Sons e Imagens e de Retransmissão de Televisão com tecnologia digital. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 161, seção 1, p. 64, 23 ago. 2014.

[17] Ideal Antenas - Antena UHF Slot com Polarização Circular-Elíptica. Disponível em: <<https://idealantenas.com.br/Antena-UHFSlotCavidadePolCirElip.html>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

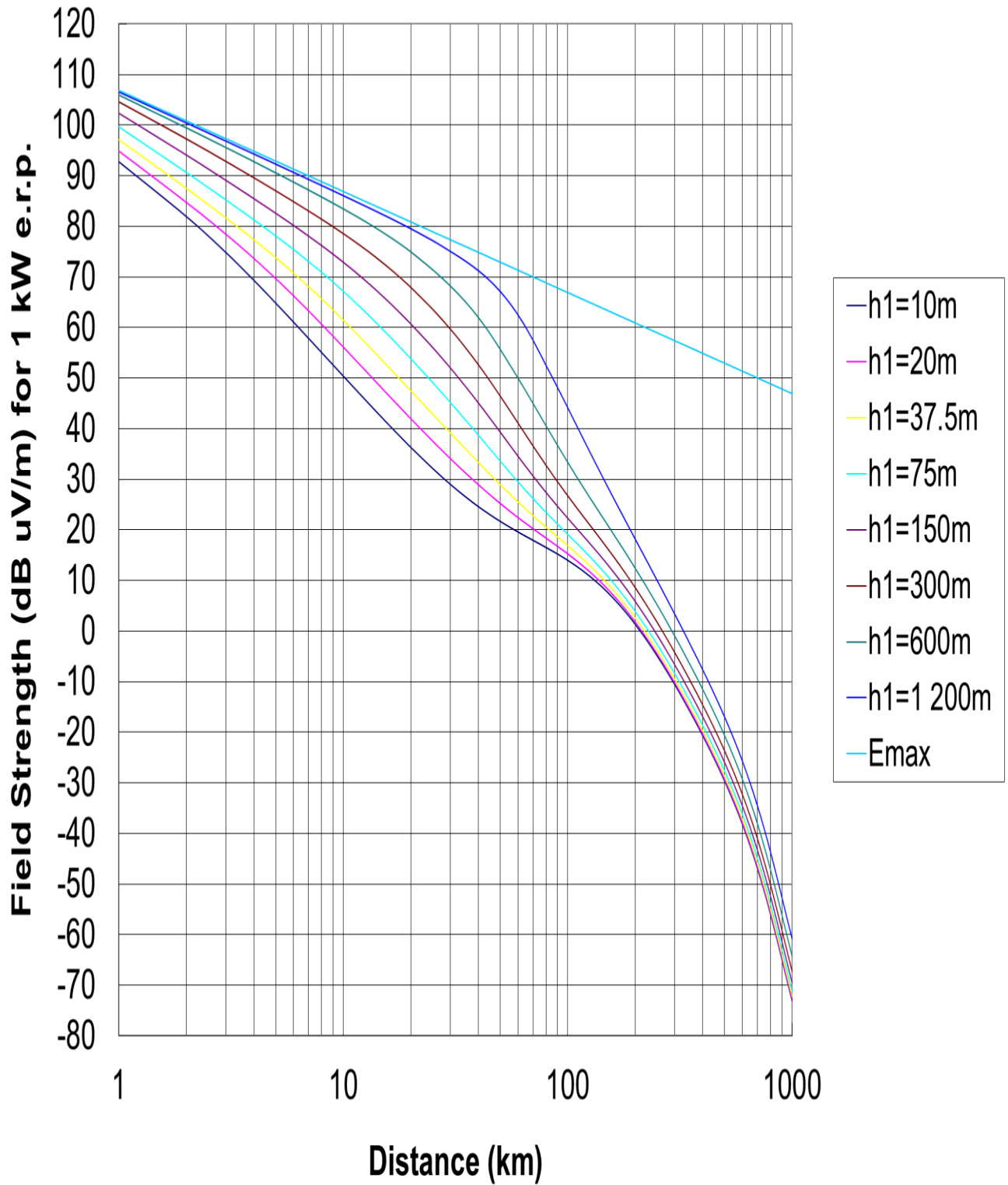
[18] User Guide Cell Master MT8212E and MT8213E. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Manuals/Users-Guide/10580-00250AB.pdf>>. Acesso em: 1 jun. 2024.

9 ANEXO A – GRÁFICOS

600 MHz, land, 50% time



600 MHz, land, 10% time



10 ANEXO B – TABELAS

Frequency	600 MHz									
Time	50									
Path	Land									
		Heights in metres								Max Field in dBuV/m
Number of distances	78	10	20	37,5	75	150	300	600	1200	0
distance in km	1	92,681	94,868	97,072	99,699	102,345	104,591	106,007	106,629	106,900
	2	81,108	84,291	87,092	90,356	93,803	97,071	99,417	100,484	100,879
	3	73,480	77,690	81,046	84,741	88,624	92,462	95,443	96,866	97,358
	4	67,693	72,675	76,575	80,667	84,877	89,107	92,562	94,285	94,859
	5	63,064	68,556	72,942	77,421	81,920	86,457	90,290	92,275	92,921
	6	59,229	65,047	69,834	74,687	79,459	84,256	88,406	90,626	91,337
	7	55,965	61,992	67,096	72,296	77,333	82,365	86,792	89,227	89,998
	8	53,130	59,293	64,640	70,152	75,447	80,700	85,376	88,010	88,838
	9	50,628	56,879	62,410	68,195	73,739	79,204	84,110	86,933	87,815
	10	48,393	54,701	60,370	66,387	72,167	77,839	82,961	85,965	86,900
	11	46,377	52,719	58,489	64,702	70,703	76,576	81,907	85,085	86,072
	12	44,542	50,904	56,748	63,122	69,327	75,396	80,928	84,279	85,316
	13	42,862	49,230	55,127	61,633	68,022	74,282	80,013	83,533	84,621
	14	41,315	47,680	53,613	60,224	66,780	73,223	79,148	82,838	83,977
	15	39,883	46,238	52,192	58,888	65,590	72,209	78,327	82,187	83,378
	16	38,553	44,890	50,856	57,617	64,447	71,233	77,541	81,574	82,818
	17	37,312	43,626	49,594	56,404	63,345	70,289	76,786	80,993	82,291
	18	36,151	42,437	48,399	55,244	62,280	69,373	76,056	80,441	81,795
	19	35,062	41,315	47,265	54,133	61,250	68,480	75,346	79,914	81,325
	20	34,038	40,254	46,185	53,066	60,250	67,607	74,655	79,408	80,879
	25	29,704	35,679	41,448	48,276	55,634	63,479	71,375	77,129	78,941
	30	26,339	31,999	37,521	44,162	51,501	59,617	68,237	75,108	77,358
	35	23,638	28,930	34,148	40,517	47,713	55,935	65,125	73,200	76,019
	40	21,411	26,304	31,182	37,224	44,194	52,395	61,999	71,296	74,859
	45	19,531	24,013	28,535	34,219	40,906	48,992	58,862	69,318	73,836
	50	17,910	21,986	26,151	31,464	37,834	45,734	55,739	67,213	72,921
	55	16,485	20,173	23,991	28,936	34,972	42,632	52,661	64,966	72,093
	60	15,211	18,536	22,027	26,616	32,314	39,698	49,656	62,591	71,337
	65	14,051	17,044	20,233	24,486	29,852	36,938	46,748	60,122	70,642
	70	12,982	15,675	18,588	22,530	27,578	34,354	43,955	57,601	69,998
	75	11,982	14,407	17,071	20,730	25,477	31,941	41,287	55,065	69,399
	80	11,037	13,223	15,666	19,068	23,536	29,694	38,752	52,542	68,838
	85	10,136	12,111	14,357	17,527	21,739	27,602	36,351	50,056	68,312
	90	9,269	11,059	13,129	16,093	20,070	25,654	34,083	47,624	67,815

95	8,429	10,056	11,972	14,751	18,515	23,837	31,944	45,257	67,346
100	7,612	9,095	10,874	13,489	17,061	22,138	29,928	42,964	66,900
110	6,030	7,273	8,825	11,164	14,407	19,050	26,235	38,617	66,072
120	4,498	5,556	6,929	9,049	12,026	16,304	22,941	34,601	65,316
130	3,004	3,915	5,147	7,093	9,855	13,830	19,982	30,910	64,621
140	1,541	2,336	3,455	5,261	7,848	11,571	17,302	27,523	63,977
150	0,103	0,805	1,834	3,528	5,972	9,484	14,854	24,413	63,378
160	-1,311	-0,684	0,272	1,873	4,200	7,538	12,597	21,550	62,818
170	-2,702	-2,137	-1,241	0,285	2,516	5,707	10,500	18,905	62,291
180	-4,070	-3,557	-2,710	-1,246	0,904	3,972	8,537	16,452	61,795
190	-5,417	-4,945	-4,140	-2,728	-0,646	2,319	6,689	14,166	61,325
200	-6,741	-6,305	-5,534	-4,166	-2,141	0,736	4,938	12,027	60,879
225	-9,955	-9,585	-8,880	-7,594	-5,677	-2,969	0,905	7,208	59,856
250	-13,033	-12,709	-12,047	-10,819	-8,976	-6,385	-2,743	2,977	58,941
275	-15,981	-15,689	-15,059	-13,871	-12,081	-9,573	-6,099	-0,816	58,113
300	-18,809	-18,541	-17,934	-16,774	-15,023	-12,577	-9,227	-4,275	57,358
325	-21,529	-21,277	-20,688	-19,550	-17,827	-15,427	-12,172	-7,473	56,662
350	-24,151	-23,913	-23,336	-22,214	-20,514	-18,150	-14,966	-10,466	56,019
375	-26,687	-26,459	-25,893	-24,784	-23,101	-20,764	-17,637	-13,294	55,419
400	-29,150	-28,930	-28,371	-27,273	-25,603	-23,288	-20,207	-15,988	54,859
425	-31,550	-31,336	-30,784	-29,694	-28,035	-25,737	-22,692	-18,575	54,332
450	-33,896	-33,688	-33,141	-32,057	-30,407	-28,124	-25,108	-21,074	53,836
475	-36,198	-35,995	-35,452	-34,374	-32,730	-30,459	-27,467	-23,501	53,366
500	-38,464	-38,264	-37,724	-36,651	-35,013	-32,752	-29,780	-25,872	52,921
525	-40,700	-40,503	-39,966	-38,896	-37,264	-35,010	-32,055	-28,195	52,497
550	-42,911	-42,717	-42,183	-41,116	-39,488	-37,241	-34,301	-30,481	52,093
575	-45,104	-44,912	-44,379	-43,315	-41,691	-39,450	-36,522	-32,737	51,707
600	-47,281	-47,090	-46,560	-45,498	-43,877	-41,641	-38,723	-34,968	51,337
625	-49,445	-49,256	-48,727	-47,667	-46,049	-43,817	-40,908	-37,178	50,982
650	-51,598	-51,411	-50,883	-49,825	-48,209	-45,981	-43,080	-39,373	50,642
675	-53,743	-53,556	-53,030	-51,974	-50,359	-48,135	-45,240	-41,552	50,314
700	-55,878	-55,693	-55,168	-54,113	-52,500	-50,278	-47,390	-43,719	49,998
725	-58,005	-57,821	-57,297	-56,243	-54,632	-52,412	-49,529	-45,873	49,693
750	-60,123	-59,939	-59,416	-58,363	-56,753	-54,536	-51,657	-48,015	49,399
775	-62,230	-62,047	-61,524	-60,472	-58,864	-56,649	-53,774	-50,144	49,114
800	-64,325	-64,143	-63,620	-62,569	-60,962	-58,748	-55,877	-52,258	48,838
825	-66,405	-66,224	-65,702	-64,652	-63,045	-60,834	-57,966	-54,355	48,571
850	-68,469	-68,288	-67,767	-66,717	-65,112	-62,901	-60,037	-56,435	48,312
875	-70,514	-70,334	-69,813	-68,764	-67,159	-64,950	-62,088	-58,493	48,060
900	-72,537	-72,356	-71,836	-70,787	-69,183	-66,975	-64,116	-60,528	47,815
925	-74,534	-74,354	-73,834	-72,786	-71,182	-68,975	-66,118	-62,537	47,577
950	-76,502	-76,323	-75,803	-74,755	-73,152	-70,946	-68,091	-64,515	47,346
975	-78,439	-78,259	-77,740	-76,693	-75,090	-72,885	-70,031	-66,461	47,120
1000	-80,340	-80,161	-79,642	-78,595	-76,993	-74,789	-71,937	-68,371	46,900

Frequency	600 MHz									
Time	10									
Path	Land									
		Heights in metres								Max Field in dBuV/m
Number of distances	78	10	20	37,5	75	150	300	600	1200	0
distance in km	1	92,788	94,892	97,076	99,699	102,345	104,591	106,007	106,629	106,900
	2	81,956	84,747	87,449	90,672	94,076	97,267	99,511	100,511	100,879
	3	74,848	78,446	81,617	85,246	89,076	92,812	95,623	96,917	97,358
	4	69,340	73,650	77,292	81,294	85,451	89,574	92,819	94,359	94,859
	5	64,860	69,686	73,762	78,128	82,577	87,011	90,613	92,369	92,921
	6	61,111	66,285	70,727	75,443	80,171	84,877	88,786	90,738	91,337
	7	57,905	63,306	68,041	73,080	78,076	83,033	87,219	89,356	89,998
	8	55,112	60,663	65,622	70,947	76,202	81,398	85,842	88,154	88,838
	9	52,644	58,294	63,421	68,991	74,491	79,917	84,607	87,090	87,815
	10	50,438	56,151	61,403	67,177	72,904	78,553	83,481	86,134	86,900
	11	48,448	54,200	59,543	65,484	71,416	77,279	82,440	85,265	86,072
	12	46,638	52,411	57,819	63,895	70,010	76,077	81,467	84,466	85,316
	13	44,982	50,764	56,216	62,397	68,673	74,932	80,549	83,727	84,621
	14	43,459	49,238	54,719	60,982	67,395	73,835	79,675	83,037	83,977
	15	42,051	47,820	53,316	59,642	66,172	72,778	78,835	82,388	83,378
	16	40,746	46,497	51,998	58,369	64,997	71,755	78,025	81,775	82,818
	17	39,531	45,259	50,757	57,158	63,866	70,762	77,239	81,193	82,291
	18	38,398	44,096	49,583	56,003	62,777	69,796	76,473	80,637	81,795
	19	37,338	43,002	48,472	54,899	61,725	68,854	75,723	80,104	81,325
	20	36,344	41,970	47,417	53,843	60,708	67,934	74,987	79,591	80,879
	25	32,186	37,563	42,829	49,148	56,071	63,622	71,455	77,239	78,941
	30	29,036	34,091	39,096	45,192	52,015	59,690	68,237	75,108	77,358
	35	26,584	31,269	35,962	41,762	48,386	56,051	65,125	73,200	76,019
	40	24,632	28,922	33,274	38,735	45,095	52,651	61,999	71,296	74,859
	45	23,045	26,935	30,938	36,040	42,094	49,468	58,862	69,318	73,836
	50	21,725	25,230	28,891	33,629	39,356	46,495	55,739	67,213	72,921
	55	20,605	23,747	27,083	31,469	36,864	43,729	52,782	64,966	72,093
	60	19,631	22,442	25,478	29,532	34,600	41,168	50,059	62,591	71,337
	65	18,766	21,279	24,043	27,791	32,545	38,808	47,476	60,122	70,642
	70	17,980	20,228	22,749	26,219	30,680	36,638	45,042	57,601	69,998
	75	17,252	19,267	21,572	24,792	28,984	34,645	42,757	55,065	69,399
	80	16,564	18,376	20,490	23,489	27,434	32,814	40,618	52,611	68,838
	85	15,905	17,539	19,487	22,288	26,012	31,127	38,619	50,394	68,312
	90	15,265	16,745	18,546	21,174	24,698	29,567	36,751	48,253	67,815
	95	14,638	15,982	17,656	20,130	23,476	28,120	35,005	46,196	67,346
	100	14,017	15,244	16,806	19,145	22,332	26,771	33,370	44,226	66,900
	110	12,784	13,818	15,196	17,311	20,231	24,313	30,390	40,542	66,072
	120	11,547	12,434	13,669	15,609	18,317	22,107	27,731	37,185	65,316
	130	10,300	11,070	12,194	13,997	16,535	20,088	25,326	34,123	64,621
	140	9,039	9,719	10,754	12,448	14,851	18,210	23,122	31,320	63,977
	150	7,768	8,374	9,339	10,945	13,239	16,440	21,077	28,741	63,378
	160	6,488	7,036	7,943	9,478	11,683	14,753	19,161	26,352	62,818
	170	5,204	5,704	6,564	8,041	10,173	13,136	17,349	24,127	62,291
	180	3,919	4,380	5,201	6,631	8,703	11,575	15,624	22,042	61,795

	190	2,638	3,066	3,855	5,246	7,267	10,064	13,974	20,078	61,325
	200	1,364	1,764	2,527	3,884	5,863	8,597	12,388	18,218	60,879
	225	-1,774	-1,424	-0,712	0,583	2,483	5,096	8,660	13,949	59,856
	250	-4,816	-4,500	-3,822	-2,569	-0,723	1,806	5,211	10,111	58,941
	275	-7,743	-7,452	-6,797	-5,575	-3,767	-1,296	1,995	6,610	58,113
	300	-10,550	-10,276	-9,638	-8,437	-6,657	-4,230	-1,021	3,380	57,358
	325	-13,237	-12,976	-12,351	-11,166	-9,407	-7,011	-3,865	0,375	56,662
	350	-15,812	-15,561	-14,945	-13,772	-12,029	-9,657	-6,560	-2,444	56,019
	375	-18,284	-18,041	-17,433	-16,269	-14,538	-12,186	-9,125	-5,108	55,419
	400	-20,668	-20,431	-19,828	-18,672	-16,950	-14,613	-11,582	-7,642	54,859
	425	-22,976	-22,743	-22,146	-20,995	-19,281	-16,956	-13,949	-10,072	54,332
	450	-25,222	-24,993	-24,400	-23,254	-21,546	-19,231	-16,243	-12,416	53,836
	475	-27,420	-27,194	-26,604	-25,462	-23,759	-21,452	-18,479	-14,695	53,366
	500	-29,583	-29,360	-28,772	-27,633	-25,935	-23,634	-20,675	-16,925	52,921
	525	-31,723	-31,502	-30,916	-29,780	-28,085	-25,790	-22,841	-19,121	52,497
	550	-33,851	-33,632	-33,048	-31,914	-30,222	-27,931	-24,992	-21,296	52,093
	575	-35,977	-35,760	-35,177	-34,045	-32,356	-30,069	-27,138	-23,463	51,707
	600	-38,110	-37,894	-37,313	-36,183	-34,495	-32,212	-29,287	-25,630	51,337
	625	-40,256	-40,041	-39,461	-38,333	-36,647	-34,367	-31,448	-27,806	50,982
	650	-42,421	-42,207	-41,628	-40,501	-38,817	-36,539	-33,625	-29,997	50,642
	675	-44,608	-44,395	-43,817	-42,691	-41,008	-38,733	-35,823	-32,207	50,314
	700	-46,819	-46,607	-46,029	-44,904	-43,223	-40,949	-38,043	-34,437	49,998
	725	-49,052	-48,840	-48,263	-47,139	-45,459	-43,186	-40,284	-36,687	49,693
	750	-51,305	-51,094	-50,517	-49,394	-47,714	-45,444	-42,544	-38,955	49,399
	775	-53,572	-53,362	-52,786	-51,663	-49,985	-47,715	-44,818	-41,236	49,114
	800	-55,848	-55,638	-55,063	-53,940	-52,262	-49,994	-47,100	-43,524	48,838
	825	-58,123	-57,913	-57,338	-56,216	-54,539	-52,272	-49,380	-45,810	48,571
	850	-60,386	-60,177	-59,603	-58,481	-56,805	-54,538	-51,648	-48,083	48,312
	875	-62,627	-62,418	-61,844	-60,723	-59,047	-56,781	-53,893	-50,332	48,060
	900	-64,832	-64,623	-64,049	-62,928	-61,253	-58,988	-56,101	-52,545	47,815
	925	-66,987	-66,779	-66,205	-65,085	-63,410	-61,146	-58,260	-54,707	47,577
	950	-69,080	-68,872	-68,298	-67,178	-65,504	-63,240	-60,356	-56,806	47,346
	975	-71,097	-70,889	-70,316	-69,196	-67,522	-65,259	-62,375	-58,829	47,120
	1000	-73,026	-72,818	-72,245	-71,125	-69,452	-67,189	-64,307	-60,763	46,900