

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1233

**PREDIÇÃO DE COBERTURA RADIOELÉTRICA USANDO MÉTODOS
DE EQUAÇÃO PARABÓLICA EM AMBIENTE METROVIÁRIO
URBANO NA FAIXA DE VHF**

Rodrigo Oliveira

DATA DA DEFESA: 27/05/2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

**PREDIÇÃO DE COBERTURA RADIOELÉTRICA USANDO MÉTODOS
DE EQUAÇÃO PARABÓLICA EM AMBIENTE METROVIÁRIO
URBANO NA FAIXA DE VHF**

Rodrigo Oliveira

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rego

Coorientador: Prof. Dr. Gláucio Lopes Ramos

Belo Horizonte - MG

Maio de 2021

O48p

Oliveira, Rodrigo.

Predição de cobertura radioelétrica usando métodos de equação parabólica em ambiente metroviário urbano na faixa de VHF [recurso eletrônico] / Rodrigo Oliveira. - 2021.

1 recurso online (96 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Cássio Gonçalves do Rego.

Coorientador: Gláucio Lopes Ramos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.87-96.

Apêndice: f.86.

Bibliografia: f.83-85.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Rádio – Teses. 3. Aspereza de superfície – Teses. I. Rego, Cássio Gonçalves do. II. Ramos, Gláucio Lopes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

"Predição de Cobertura Radioelétrica Usando Métodos de Equação Parabólica Em Ambiente Metroviário Urbano Na Faixa de VHF"

RODRIGO OLIVEIRA

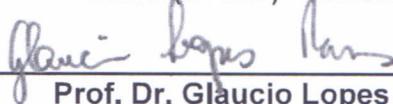
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 27 de maio de 2021.

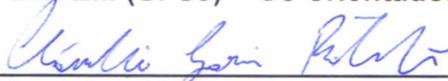
Por:



Prof. Dr. Cássio Gonçalves do Rego
DELT (UFMG) – Orientador



Prof. Dr. Glaucio Lopes Ramos
DETEM (UFSJ) – Co-orientador



Prof. Dr. Cláudio Garcia Batista
DETEM (UFSJ)



Prof. Dr. Fernando José da Silva Moreira
DELT (UFMG)

AGRADECIMENTOS

À Deus e a minha mãe Lucia Antônia de Oliveira, que me concederam o dom da vida e os ensinamentos necessários para superar os desafios;

Ao meu professor e orientador Cássio Gonçalves do Rego pelos ensinamentos acadêmicos, conselhos, críticas e sugestões, além de uma boa convivência e diálogos satisfatórios em uma época de pandemia e isolamento social;

À Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), em especial ao Engenheiro Carlos Paixão, por proporcionar a base de dados para o desenvolvimento deste trabalho;

À GAP Service, em especial ao Engenheiro Gilmar Aparecido Pereira, por ter se predisposto com o desenvolvimento deste estudo;

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFMG, em especial ao amigo Diego Andreas Parada Roza e ao meu coorientador Gláucio Lopes Ramos pelas contribuições e preciosas discussões.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal aprimorar uma ferramenta computacional de predição de cobertura radioelétrica para simular casos práticos de uma campanha de medições em campo, com o intuito de comparar as previsões com os valores reais, avaliando dessa forma o desempenho do algoritmo que utiliza o método DMFT-SSPE.

Dentre as melhorias efetuadas, é possível destacar dois eixos estruturantes. O primeiro sobre o desenvolvimento de metodologias simples e eficientes para extrair parâmetros de cenários realísticos, como diagrama de radiação de antenas comerciais e perfis topográficos de qualquer localidade. O segundo sobre a implementação de uma técnica que adiciona efeitos de retroespalhamento do campo eletromagnético, que é fundamental quando se analisa a propagação em terrenos irregulares, tornando assim os resultados computacionais mais precisos.

A campanha de medições integra um estudo de engenharia realizado ao longo de uma via férrea de metrô, em ambiente urbano, que mensurou a cobertura de rádio na faixa de frequência de VHF. Nela foram utilizados equipamentos profissionais que coletaram a base de dados necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Através de uma análise estatística dos níveis de potência recebida e da rugosidade dos enlaces foi possível tanto avaliar a acurácia das soluções NAPE e WAPE quanto direcionar esforços para pesquisas futuras. Por fim, mas não menos importante, a criação de uma interface gráfica do usuário, para apresentação dos parâmetros de entrada e dos resultados de saída da simulação, finaliza as contribuições deste estudo.

Palavras-chave: DMFT-SSPE, retroespalhamento, rugosidade, NAPE, WAPE, VHF, casos práticos, predição de cobertura.

ABSTRACT

The main objective of this work is to improve a computational tool of radio coverage prediction to simulate practical cases of a measurement campaign, in order to compare the predictions with real values, evaluating the performance of the algorithm that uses the DMFT-SSPE method.

Among the improvements made, it is possible to highlight two structuring topics. The first is the development of simple and efficient methodologies to extract parameters from realistic scenarios, such as radiation pattern of commercial antennas and topographic profiles of any location. The second is the implementation of a technique that considers backscattering effects of the electromagnetic field, which is very important when analyzing the propagation in irregular terrain, making the computational results more accurate.

The measurement campaign is part of an engineering study done along a subway track in an urban environment, which measured the radio coverage in the VHF frequency range. Professional equipment was used to collect the database needed for the development of this work.

Through a statistical analysis of received power levels and terrain roughness it was possible to evaluate the accuracy of the NAPE and WAPE solutions and direct future research efforts. Last but not least, the creation of a graphical user interface, for displaying the input parameters and output results, concludes the contributions of this study.

Keywords: DMFT-SSPE, backscattering, roughness, NAPE, WAPE, VHF, practical cases, coverage prediction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modos básicos de propagação.	14
Figura 2.2 - Exemplo de perfil topográfico desenhado sobre papel de traçado [4].	16
Figura 2.3 - Princípio de Huygens e difração [4].	18
Figura 2.4 - Principais modelos computacionais para predição de cobertura radioelétrica... ..	19
Figura 3.1 - Modo de propagação do modelo PE.....	23
Figura 3.2 - Polarizações da onda eletromagnética.	23
Figura 3.3 - Domínios computacionais do algoritmo SSPE.	26
Figura 3.4 - Janela de Hanning em função da altitude.	29
Figura 4.1 - Visualização das estações e linha férrea do metrô.	34
Figura 4.2 - Visualização dos pontos de transmissão e linha férrea do metrô.....	35
Figura 4.3 - Esquemático do sistema de transmissão e recepção.....	36
Figura 4.4 - Amostras do nível de sinal recebido com a repetidora em Centelha 1.	38
Figura 4.5 - Equipamentos do sistema de transmissão instalado em Centelha 1.....	39
Figura 5.1 - Esquemático do programa de predição de cobertura.....	40
Figura 5.2 - Mapa do campo com falsa região de campo nulo.	41
Figura 5.3 - Mapa do campo com processamento correto.	42
Figura 5.4 - Cartas topográficas para o estado de Minas Gerais [7].....	43
Figura 5.5 - Projeto utilizando o QGIS para extração da altimetria dos enlaces.	43
Figura 5.6 - Comparação entre dados de altimetria originais e interpolados.	44
Figura 5.7 - Comparação entre dados de altimetria interpolados e escalonados.	45
Figura 5.8 - Extração de dados do diagrama de radiação da antena transmissora.	47
Figura 5.9 - Extração de dados do diagrama de radiação da antena receptora.	48
Figura 5.10 - Mapa do campo para o enlace entre Centelha 1 e Estação Santa Efigênia. ...	49
Figura 5.11 - Perfil de potência recebida no enlace entre Calafate e Estação Lagoinha.	51
Figura 5.12 – Atenuação ao longo do enlace entre Eldorado e Estação Gameleira.....	52
Figura 5.13 - Variação altimétrica no enlace entre CCO e Estação Vila Oeste.	54
Figura 6.1 - Valores da rugosidade dos enlaces.	57
Figura 6.2 - Valores da rugosidade normalizada dos enlaces.	57
Figura 6.3 - Correlação entre a técnica com menor erro absoluto e o valor da rugosidade. .	59
Figura 6.4 - Distância entre transmissor e receptor dos enlaces.	60
Figura 6.5 - Agrupamento dos enlaces.	61
Figura 6.6 - Frequência relativa dos enlaces nas classes de erro absoluto para o Grupo 1.	63
Figura 6.7 - Histograma do erro absoluto para o Grupo 1.	63

Figura 6.8 - Dispersão do Erro Absoluto para o Grupo 1.	65
Figura 6.9 - Comparação entre valores computacionais e medidos do Grupo 1.	66
Figura 6.10 - Percentual dos enlaces nas classes de erro absoluto para o Grupo 2.	67
Figura 6.11 - Histograma do erro absoluto para o Grupo 2.	68
Figura 6.12 - Dispersão do Erro Absoluto para o Grupo 2.	69
Figura 6.13 - Comparação entre valores computacionais e medidos do Grupo 2.	70
Figura 7.1 - Modelo de propagação 2W-SSPE	72
Figura 7.2 - Mapa do campo WAPE e NAPE considerando o retroespalhamento.....	76
Figura 7.3 - Comparação de resultados sem e com retroespalhamento da solução WAPE.	77
Figura 7.4 - Interface gráfica do programa de predição de cobertura desenvolvido.	79
Figura 7.5 - Apresentação de resultados para Solução NAPE pela GUI.	80
Figura 7.6 - Apresentação de resultados para Solução WAPE pela GUI.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Bandas de radiofrequências.....	13
Tabela 2.2 - Tipos de solo e seus parâmetros eletromagnéticos.	16
Tabela 4.1 - Estações de metrô e suas localizações geográficas.	35
Tabela 4.2 - Equipamentos do sistema de transmissão.	36
Tabela 4.3 - Equipamentos do sistema de recepção.....	37
Tabela 4.4 - Resumo dos testes da campanha de medições.	38
Tabela 6.1 - Parâmetros de entrada utilizados na compilação do algoritmo DMFT-SSPE. ...	55
Tabela 6.2 - Rugosidade dos perfis de enlace.	56
Tabela 6.3 - Rugosidade normalizada dos perfis de enlace.	58
Tabela 6.4 - Distâncias agrupadas entre transmissor e receptor.	60
Tabela 6.5 - Frequências e porcentagens do Grupo 1 por faixa de erro absoluto.	63
Tabela 6.6 - Frequências e porcentagens do Grupo 2 por faixa de erro absoluto.	67
Tabela 7.1 - Resultados computacionais e valor medido.	78
Tabela 7.2 - Descritivo da interface gráfica do usuário.....	79

GLOSSÁRIO

PE	<i>Parabolic Equation</i>
SSFT	<i>Split-Step Fourier Transform</i>
SSPE	<i>Split-Step Parabolic Equation</i>
1W-SSPE	<i>One-Way Split-Step Parabolic Equation</i>
2W-SSPE	<i>Two-Way Split-Step Parabolic Equation</i>
NAPE	<i>Narrow Angle Parabolic Equation</i>
WAPE	<i>Wide Angle Parabolic Equation</i>
MoM	<i>Method of Moment</i>
FEM	<i>Finite-Element Method</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
GO	<i>Geometrical Optics</i>
GTD	<i>Geometrical Theory of Diffraction</i>
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i>
PO	<i>Physical Optics</i>
PTD	<i>Physical Theory of Diffraction</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
ULF	<i>Ultra Low Frequency</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
HF	<i>High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	10
1.1 Motivação.....	10
1.2 Justificativa do trabalho	10
1.3 Estrutura da dissertação	11
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS INICIAIS	13
2.1 Propagação de ondas de rádio	13
2.2 Variação atmosférica.....	14
2.3 Parâmetros eletromagnéticos do solo.....	15
2.4 Perfil topográfico	16
2.5 Rugosidade	17
2.6 Modelos computacionais	18
2.7 Planejamento de redes.....	20
CAPÍTULO 3 - MODELO DA EQUAÇÃO PARABÓLICA	21
3.1 Revisão bibliográfica.....	21
3.2 Formulação numérica.....	22
3.3 Domínio computacional	26
3.3.1 Domínio analítico.....	26
3.3.2 Camada absorvente	28
3.3.3 Contorno do solo.....	29
3.3.4 Domínio do método SSPE.....	32
CAPÍTULO 4 - CAMPANHA DE MEDIÇÕES	34
4.1 Ambiente de estudo	34
4.2 Metodologia.....	37
4.3 Medições	37
CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO	40
5.1 Programa desenvolvido.....	40
5.2 Parâmetros de entrada.....	42
5.2.1 Perfil topográfico.....	42
5.2.2 Transmissor e receptor	45
5.3 Parâmetros de saída	49
5.3.1 Mapa do campo.....	49

5.3.2 Potência recebida.....	50
5.3.3 Atenuação ao longo do caminho de propagação.....	51
5.3.4 Rugosidade.....	53
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS.....	55
6.1 Definição da solução computacional.....	56
6.2 Análise estatística do Grupo 1.....	62
6.3 Análise estatística do Grupo 2.....	67
CAPÍTULO 7 - IMPLEMENTAÇÕES FINAIS.....	71
7.1 Retroespalhamento.....	71
7.1.1 Formulação numérica.....	73
7.1.2 Parâmetros de saída.....	74
7.1.3 Simulação.....	75
7.2 Interface gráfica do usuário.....	78
7.3 Propostas de continuidade.....	81
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
APÊNDICE.....	86
Apêndice A - Rugosidade de um terreno.....	86
ANEXO.....	87
Anexo A - <i>Drive test</i>	87
Anexo B - Resultados computacionais e medições em campo.....	95

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O estudo da predição de cobertura radioelétrica refere-se à previsão do comportamento do sinal de radiofrequência envolvendo a estação transmissora e a estação receptora. Essa avaliação é o ponto de partida para o projeto, implantação e gerenciamento de redes sem fio [1].

Atualmente, devido aos avanços tecnológicos e alta demanda por serviços de telecomunicações, a exigência é cada vez maior no planejamento de redes, aumentando a complexidade das ferramentas computacionais que passaram a considerar características específicas do canal de comunicação: posição das antenas, condutividade do solo, índice de refração da atmosfera, efeitos multipercurso, retroespalhamento, dentre outros.

O espectro eletromagnético é um recurso limitado no que tange projetos de radiopropagação, portanto o seu uso eficiente é uma premissa para que os desenvolvedores possam entregar sistemas com grande disponibilidade e alta taxa de dados para o usuário. Através dos *softwares* de predição de cobertura é possível reduzir os custos com campanhas de medições em campo e também ajudam a otimizar o desempenho do sistema.

1.2 Justificativa do trabalho

Nos últimos anos o GAPTEM (Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) vem desenvolvendo ferramentas computacionais para predição de cobertura radioelétrica. Dentre os modelos desenvolvidos, o que utiliza o método SSPE (*Split-Step Parabolic Equation*) tem grande destaque devido a sua adaptabilidade em diversos ambientes de propagação e principalmente ao seu rápido tempo de processamento, que é primordial em engenharia de redes.

O algoritmo desenvolvido utilizando esse método foi intensamente testado e seus resultados comparados com outros *softwares* para validar seu desempenho [2]. Contudo, os testes foram realizados em cenários canônicos, que utilizam fontes

gaussianas e terrenos com geometria regular, surgindo assim a oportunidade de trabalhos futuros avaliarem sua performance em casos práticos, que utilizam antenas realísticas e relevo com geometria aleatória.

Em 2019 a Empresa Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) através da Superintendência de Trens Urbanos de Belo Horizonte (STU/BH), que cuida da operação do metrô da cidade, contratou os serviços de uma empresa terceirizada para executar um estudo de radiopropagação, que avaliou a cobertura de um novo sistema de rádio ao longo da via férrea. O autor dessa dissertação, como funcionário da CBTU, obteve acesso aos dados levantados nas campanhas de medições, surgindo então a possibilidade de desenvolver um estudo de caso utilizando o programa desenvolvido no GAPTEM em um ambiente realístico urbano.

A contribuição deste trabalho é criar uma metodologia prática e eficiente para parametrizar cenários realísticos com o objetivo de utilizar as variáveis no algoritmo SSPE e confrontar os resultados das predições gerados com os valores da base de dados das campanhas de medições. Através de uma análise comparativa é possível tanto avaliar o desempenho da ferramenta quanto direcionar esforços de pesquisas futuras. Além disso, algumas melhorias serão implementadas com o intuito de aprimorar o algoritmo.

1.3 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 foi exposto uma contextualização dessa dissertação, abordando os principais fundamentos que motivaram o desenvolvimento desse trabalho.

O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos a respeito de radiopropagação com o objetivo de familiarizar o leitor com aspectos importantes que serão tratados nos tópicos seguintes.

O Capítulo 3 mostra os principais conceitos da técnica computacional aplicada no algoritmo de predição de cobertura radioelétrica.

O Capítulo 4 descreve o ambiente onde foram realizadas as campanhas de medições e a metodologia aplicada.

O Capítulo 5 coloca em foco o *software* desenvolvido, apresentando as metodologias utilizadas para parametrização dos enlaces e também os resultados que são gerados.

O Capítulo 6 apresenta uma comparação entre as predições e as medições, avaliando tanto o desempenho quantitativo dos resultados quanto os aspectos qualitativos da técnica computacional empregada.

O Capítulo 7 discorre sobre os aprimoramentos finais adicionados ao programa: implementação dos efeitos de retroespalhamento e criação de uma interface gráfica para apresentação dos resultados. Além disso serão elencadas as propostas de continuação para trabalhos futuros.

Por fim, o Capítulo 8 expressa as conclusões e considerações finais sobre o estudo desenvolvido.

CAPÍTULO 2 - CONCEITOS INICIAIS

O conteúdo de cada tópico não tem a finalidade de esgotar o assunto tratado, mas de apresentar fatores que influenciam no desempenho de enlaces de rádio com características específicas deste estudo. Para maiores detalhes recomenda-se recorrer às referências bibliográficas.

2.1 Propagação de ondas de rádio

A propagação das ondas de rádio é um modo de transmissão da energia eletromagnética que é radiada por uma antena e se propaga através do espaço. Por acordo internacional, o espectro de radiofrequência é dividido em bandas e cada uma recebe uma designação, conforme Tabela 2.1. O canal de comunicação é dependente de vários fatores, principalmente da faixa de frequência utilizada, exigindo estudos teóricos e dados estatísticos para sua caracterização.

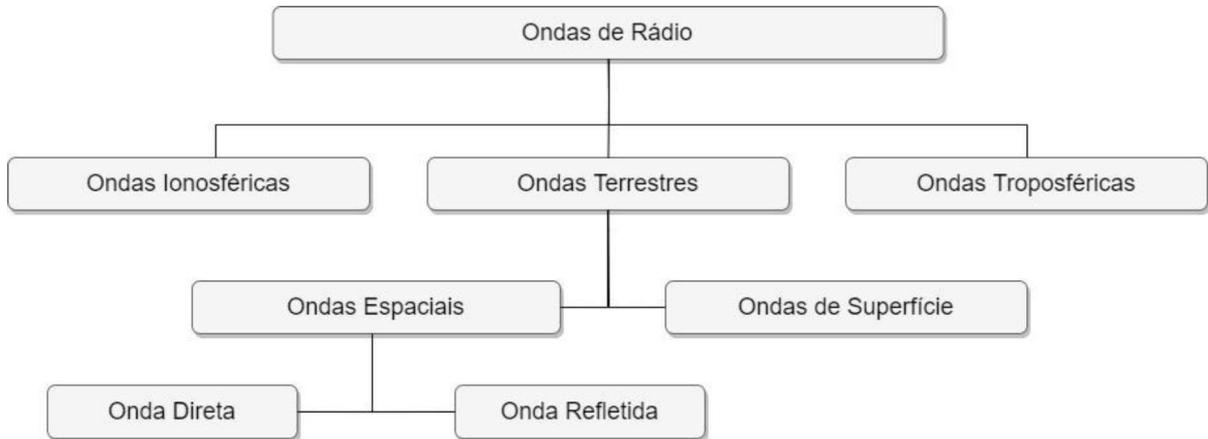
Tabela 2.1 - Bandas de radiofrequências.

Denominação	Faixa de Frequências
ULF	300 Hz a 3 kHz
VLF	3 kHz a 30 kHz
LF	30 kHz a 300 kHz
MF	300 kHz a 3 MHz
HF	3 MHz a 30 MHz
VHF	30 MHz a 300 MHz
UHF	300 MHz a 3 GHz
SHF	3 GHz a 30 GHz
EHF	30 GHz a 300 GHz

As ondas também são classificadas de acordo a região da atmosfera na qual é feita a transmissão. Quando se propagam através da ionosfera são conhecidas como ondas ionosféricas, através da troposfera como ondas troposféricas e aquelas que se propagam muito próximas da superfície da terra são chamadas de ondas terrestres, que são convenientemente divididas em ondas espaciais e ondas de superfície. As ondas espaciais podem ser subdivididas em onda direta, que se propaga pelo caminho direto entre o transmissor e receptor, e onda refletida, que chega ao receptor

por meio da reflexão no solo [3]. O esquema da Figura 2.1 ilustra esses modos de propagação.

Figura 2.1 - Modos básicos de propagação.



Neste trabalho, serão avaliados enlaces ponto a ponto com frequência na faixa de VHF, mais especificamente 163,94625 MHz. Portanto, as principais componentes do sinal recebido serão as ondas troposféricas e as ondas espaciais. Nesse sentido, algumas características do ambiente em estudo serão importantes: a variação atmosférica, os parâmetros eletromagnéticos do solo, o perfil topográfico e sua rugosidade, que será utilizada para caracterizar terrenos que envolvam multipercursos.

2.2 Variação atmosférica

A parte da atmosfera de grande interesse na propagação de ondas de rádio em VHF é a troposfera. Devido a sua não homogeneidade, a propagação faz com que diferentes pontos da frente de onda tenham diferentes velocidades, tornando a trajetória dependente dessa não uniformidade, fenômeno quantificado pelo índice de refração [4].

Neste trabalho foi utilizada a recomendação ITU-R P.453-14 [5] que define o valor da variação do índice de refração (n) com a altitude (z) para a atmosfera padrão, através da Equação (2.1):

$$n(z) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times e^{-z/z_0}, \quad (2.1)$$

onde N_0 representa o valor médio da refratividade atmosférica no nível do mar e z_0 a altura de escala definida em quilômetros. Essas variáveis podem ser definidas estatisticamente para diferentes climas, porém a norma estabelece como referência valores para uma média global: $N_0=315$ e $z_0=7,35$ km.

Devido à presença do fator 10^{-6} na Equação (2.1), o valor do índice de refração é apenas uma pequena fração maior que a unidade, sendo conveniente a definição do parâmetro N , denominado refratividade, quantificado através da Equação (2.2):

$$N = (n - 1) \times 10^6 . \quad (2.2)$$

A densidade da troposfera depende da pressão, temperatura e umidade, parâmetros que variam com a altitude. Por isso, algumas condições anômalas de propagação podem surgir, devido às mudanças físicas na atmosfera, como por exemplo dutos de superfície e dutos elevados, que poderão levar o sistema a condição de inoperância [4]. Contudo, esses efeitos não serão considerados neste trabalho, uma vez que a atmosfera é definida como padrão.

2.3 Parâmetros eletromagnéticos do solo

Exceto para campos eletromagnéticos muito intensos, que originam ionização significativa do solo, o comportamento eletromagnético do solo é essencialmente linear, mas a condutividade (σ) e a permissividade elétrica (ϵ) são fortemente dependentes da frequência, ou mais precisamente do comprimento de onda do sinal (λ). A permeabilidade magnética (μ) pode ser considerada igual à permeabilidade magnética do vácuo (μ_0) [6].

A permissividade relativa complexa (γ) é definida pela análise da permissividade relativa elétrica (ϵ_r) e da condutividade do solo, conforme Equação 2.3 [2], em relação a polarização da onda eletromagnética, vertical ou horizontal. Os valores típicos desses parâmetros para caracterização da impedância de superfície são exibidos na Tabela 2.2 [1].

$$\gamma = \epsilon_r + i60\sigma\lambda . \quad (2.3)$$

Esses valores são importantes para estimar as perdas decorrentes da interação entre as ondas e o terreno. Nesse trabalho, a impedância foi caracterizada com parâmetros eletromagnéticos de um solo do tipo médio, $\epsilon_r = 15$ e $\sigma = 0,012$ S/m.

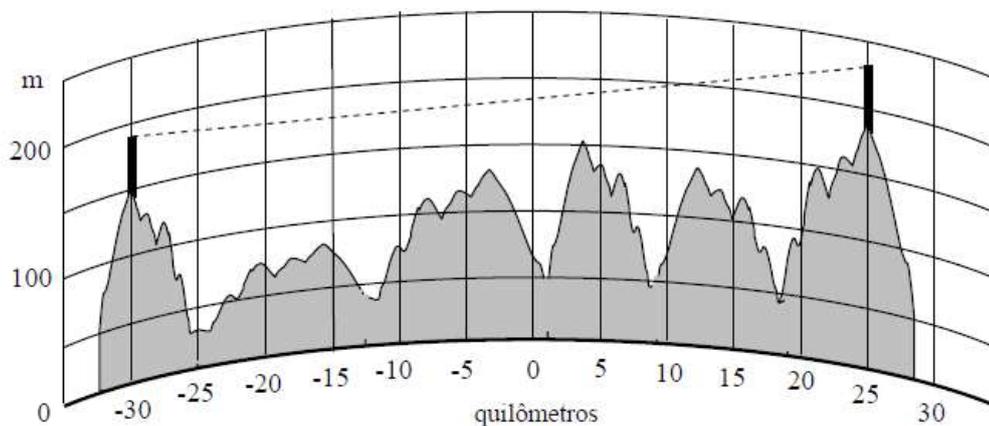
Tabela 2.2 - Tipos de solo e seus parâmetros eletromagnéticos.

Tipo de solo	Permissividade relativa (ϵ_r)	Condutividade (σ) [S/m]
Seco	6	0,001
Médio	15	0,012
Úmido	27	0,02
Oceano	81	2
Lagoa	81	0,01
Areia seca	3	0,001
Areia úmida	30	0,01

2.4 Perfil topográfico

Para verificar o comportamento da propagação da onda eletromagnética no enlace entre o transmissor e o receptor é necessário fazer um levantamento topográfico da região para analisar a influência dos obstáculos e do relevo no desempenho do sistema. Um perfil topográfico é a representação gráfica de um corte vertical do terreno segundo uma direção previamente estabelecida que possibilita a representação dos desníveis da superfície, conforme mostrado na Figura 2.2. Isso pode ser feito a partir de carta topográfica ou de modelo digital de elevação (MDE).

Figura 2.2 - Exemplo de perfil topográfico desenhado sobre papel de traçado [4].



Os dados espaciais do relevo brasileiro foram elaborados com base nas imagens da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizadas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A partir do processamento dessas imagens, a EMBRAPA-Monitoramento por Satélite, através do projeto Brasil em Relevo, disponibiliza de forma gratuita cartas topográficas com os dados altimétricos de todos os estados da federação [7]. Essas cartas serão utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, conforme será detalhado na Subseção 5.2.1.

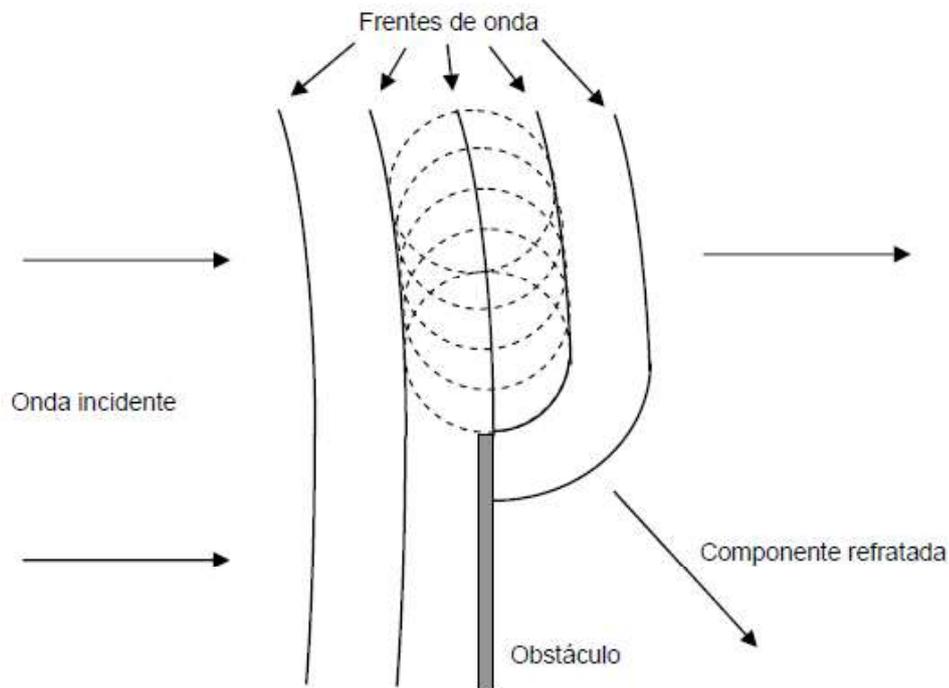
2.5 Rugosidade

Grande parte dos serviços que utilizam a banda VHF operam em regiões urbanas ou rurais, portanto é comum que o terreno no percurso de propagação contenha irregularidades, sendo necessário considerar os efeitos dessa topografia na previsão da intensidade do campo. Essas irregularidades podem afetar o sinal por meio de reflexões, difrações, obstruir zonas de Fresnel ou a visada direta do enlace.

A rugosidade de um terreno comumente quantifica a variação altimétrica de uma determinada área de pesquisa e por isso é amplamente aplicada na caracterização do relevo, conforme será apresentado na Subseção 5.3.4. Sendo assim, conhecer a morfologia da região é importante para o planejamento da cobertura do sistema. Regiões de sombra eletromagnética está relacionada ao relevo, vegetação e construções, fatores que fazem com que o sinal chegue ao receptor basicamente através de espalhamento e da difração [3].

Esses fenômenos podem ser melhor compreendidos por meio do princípio de Huygens, que pode ser resumido segundo dois tópicos principais: o primeiro diz que cada elemento de uma frente de onda em um determinado instante de tempo pode ser considerado o centro de uma fonte secundária que gera frentes de ondas esféricas; o segundo diz que a posição da frente de onda em qualquer posição no tempo é a envoltória de todas as frentes de ondas esféricas [4]. A Figura 2.3 ilustra esse princípio e mostra o fenômeno da difração.

Figura 2.3 - Princípio de Huygens e difração [4].



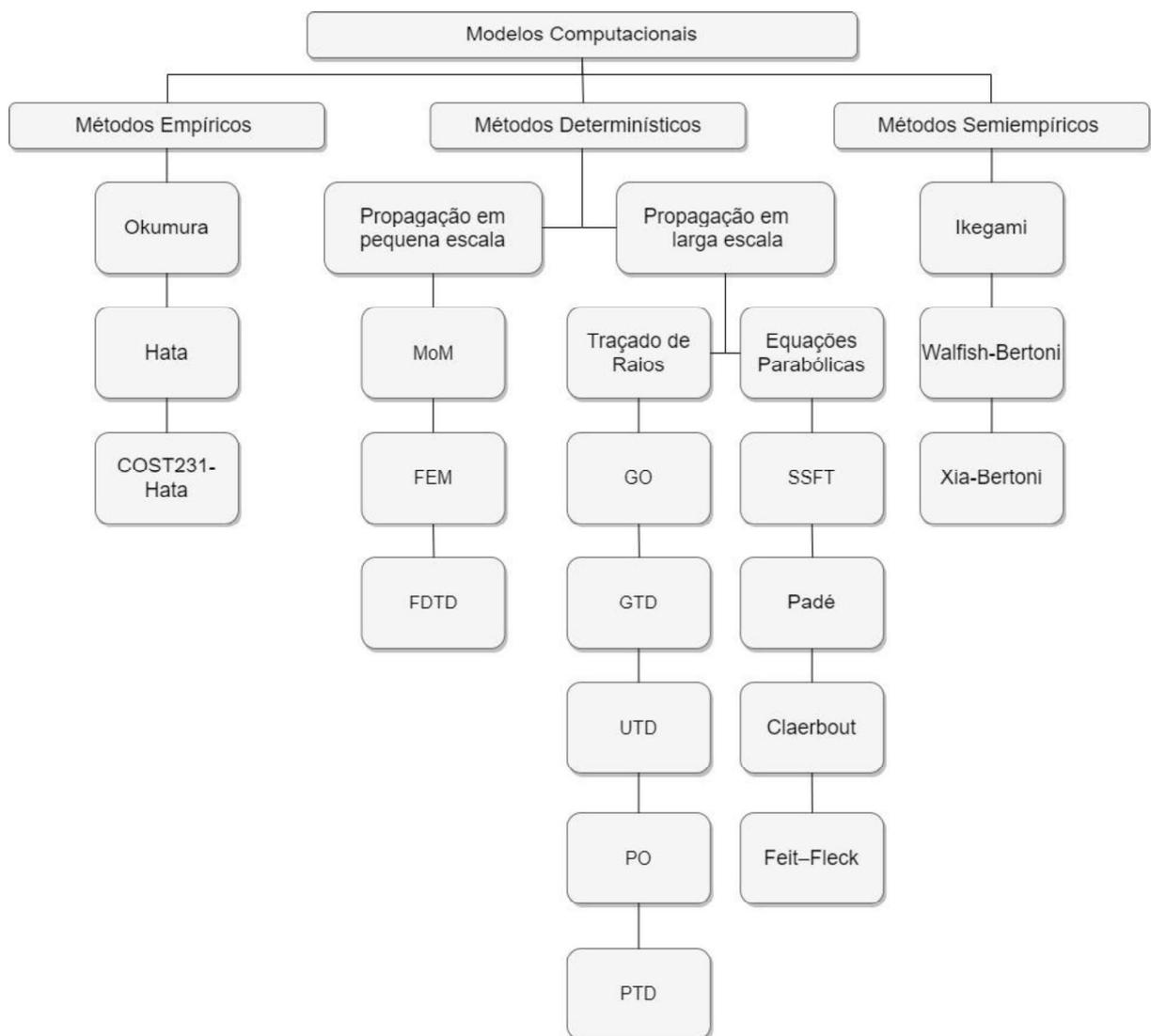
2.6 Modelos computacionais

Nas últimas décadas, ferramentas computacionais têm sido desenvolvidas com o objetivo de prever o comportamento do sinal de radiofrequência dentro de um ambiente de propagação [8]. Um dos primeiros modelos foi introduzido por Friis, em 1946, para propagação no espaço livre, e desde então pesquisadores e cientistas continuam desenvolvendo técnicas que possam aprimorar essas previsões. Os modelos de propagação são agrupados nas seguintes classificações: empíricos, semiempíricos e determinísticos, conforme Figura 2.4. A escolha por um tipo de modelo está relacionada com o compromisso com a precisão, a disponibilidade de informações do ambiente e o esforço computacional [3].

Os modelos empíricos são os mais simples e se baseiam em dados estatísticos de medições, fornecendo resultados através de ábacos ou expressões para o valor médio da atenuação. Os modelos semiempíricos são caracterizados por mesclar equações analíticas e dados estatísticos derivados também de medições. Como esses modelos são baseados em medições realizadas em locais específicos, eles tendem a não fornecer resultados muito confiáveis quando aplicados em regiões que diferem muito da original.

Já os modelos determinísticos buscam considerar os principais mecanismos de propagação como reflexão e difração, efeitos da atmosfera e do relevo, dentre outros, para atender detalhadamente as características do ambiente em análise, fornecendo grande confiabilidade dos valores preditos. Cada um desses métodos possui vantagens e desvantagens, por isso alguns estudos buscam desenvolver modelos híbridos que combinam mais de um modelo para criar uma técnica que atenda a determinados requisitos de aplicabilidade [9].

Figura 2.4 - Principais modelos computacionais para predição de cobertura radioelétrica.



As siglas apresentadas na Figura 2.4 são definidas no Glossário deste trabalho.

2.7 Planejamento de redes

O tráfego de telecomunicações está aumentando nos últimos anos e as operadoras possuem o desafio de atender os clientes com a melhor recepção de sinal possível. Isso pode ser alcançado através de um bom planejamento da rede visando proporcionar uma melhor cobertura e atender a demanda de dados.

Para aumentar a capacidade de tráfego de uma região, novos sistemas de transmissão são instalados em locais que devem otimizar a cobertura do sinal. Durante o planejamento desses sistemas duas técnicas são utilizadas: *site survey* e *drive test* [10].

O *site survey* é uma etapa do planejamento de rede que busca encontrar o local ideal para instalação do sistema irradiante. A escolha incorreta do local pode afetar a eficiência do sistema em termos de qualidade, capacidade e cobertura do sinal na região. Para isso são utilizadas ferramentas computacionais de predição de cobertura, imagens de satélite com boa resolução e visitas a campo.

O *drive test* é uma etapa de coleta de dados, utilizando *hardware* e *software* para armazenamento do nível de sinal enquanto é realizado um deslocamento ao longo da região de interesse, fazendo uso ou não de um veículo. Os valores armazenados geralmente são: data, hora, latitude, longitude e potência recebida. Esses dados são analisados para o correto planejamento da rede e muitas vezes utilizados para validar um processo de predição de cobertura.

CAPÍTULO 3 - MODELO DA EQUAÇÃO PARABÓLICA

A predição de intensidade de sinal não é uma ciência exata, isso significa que mesmo para uma pequena área usando vários métodos empíricos, semiempíricos ou determinísticos, ainda assim a previsão será unicamente uma estimativa. Podemos dizer que a principal justificativa para caracterização de canais de rádio, para estimar a cobertura em uma determinada região, é minimizar o custo de projeto, planejamento e implantação de um sistema *wireless* [11].

Para o desenvolvimento de ferramentas de propagação computacionalmente eficientes é essencial a representação de dados geográficos precisos e métodos efetivos de extração de informação da base de dados. Quando se trata de precisão, nenhum método supera todos os outros em todas as condições, portanto o engenheiro deve estar preparado para trocar precisão por simplicidade e facilidade de aplicação [3].

Recentemente, as ferramentas computacionais de propagação baseadas nas equações parabólicas (PE) tornaram-se atraentes quando comparadas com outras abordagens numéricas, devido a sua adaptabilidade em cenários diversos e realísticos e também em relação a sua precisão nas predições e ao baixo tempo de processamento computacional [12].

3.1 Revisão bibliográfica

O uso do método PE para estudos de propagação ganhou destaque com o trabalho de Leontovich e Fock [13], em 1946, resolvendo o problema da propagação troposférica de ondas considerando a terra esférica. Em 1973, com o avanço da capacidade de processamento dos computadores, Hardin e Tappert [14] desenvolveram o algoritmo SSFT (*Split-Step Fourier Transform*) para resolver numericamente a PE em pesquisas de acústica subaquática.

Desde a década de 1980 o modelo PE foi sendo aperfeiçoado e em 1983 os trabalhos de Dockrey [15],[16] introduziram o algoritmo SSFT-PE no contexto de radiopropagação troposférica, alcançando excelentes resultados. Essa técnica ficou conhecida como SSPE (*Split-Step Parabolic Equation*) nos estudos subsequentes.

Posteriormente, em 1996, Dockrey e Kuttler [17] desenvolveram o método DMFT (*Discrete Mixed Fourier Transform*) para incluir condições de impedância de

superfície de forma automática no algoritmo SSPE. Essa contribuição foi muito importante porque os terrenos passaram a ser caracterizados de forma realística, apresentando atenuações para propagação das ondas. Além disso, em 2000, o trabalho publicado por Levy [18] tornou possível que o SSPE passasse a trabalhar com terrenos irregulares, através de técnicas de modelagem por escalonamento e linear por partes. Em pesquisas posteriores essa junção de técnicas ficou conhecida como DMFT-SSPE.

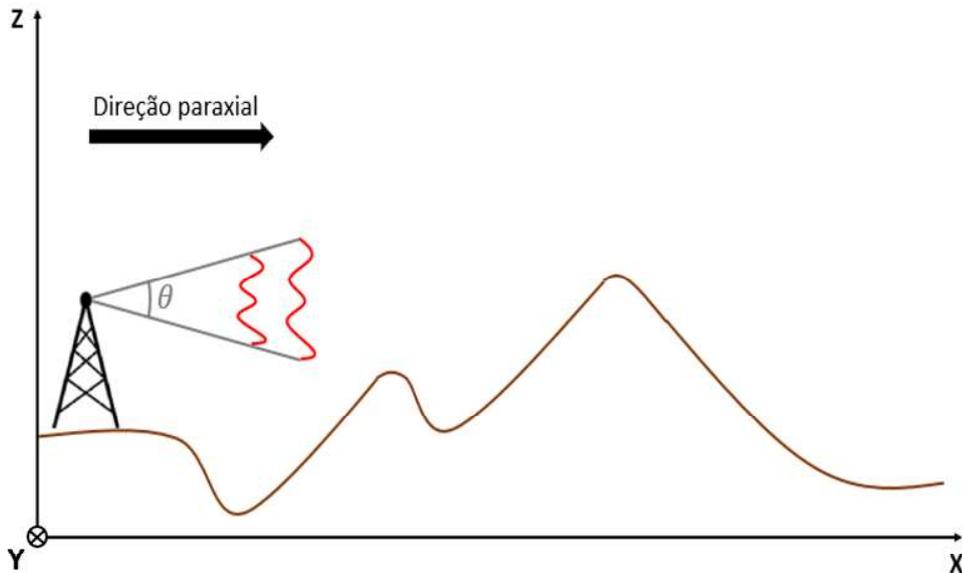
Um parâmetro importante na utilização do algoritmo é o valor do ângulo de propagação θ , conforme Figura 3.1, que define duas formulações para resolver as equações parabólicas: NAPE (*Narrow Angle Parabolic Equation*) e WAPE (*Wide Angle Parabolic Equation*). De acordo os estudos de Kuttler [19] e Ozgun *et al* [20], a primeira é aplicada em contextos de longo alcance, em que o ângulo de propagação é inferior a 15° , e a segunda em problemas de curto alcance e que envolvam multipercurso, com ângulo de propagação com aproximadamente 30° .

O método SSPE ganhou grande aceitabilidade por resolver problemas de propagação de longo alcance, obtendo baixo tempo de processamento, estabilidade numérica e pouca memória de cálculo, conforme estudo publicado por Gadwal e Barrios [21] em 2009. Além disso, sua capacidade em resolver problemas práticos de propagação de ondas terrestres, que consideram a dependência da refratividade atmosférica com a distância e as irregularidades do terreno, motivou a criação de ferramentas computacionais para predição de cobertura radioelétrica, como por exemplo o PETOOL, um *software* de código aberto desenvolvido em 2011 por Ozgun, Apaydin, Kuzuoglu e Sevgi [20] em ambiente MATLAB.

3.2 Formulação numérica

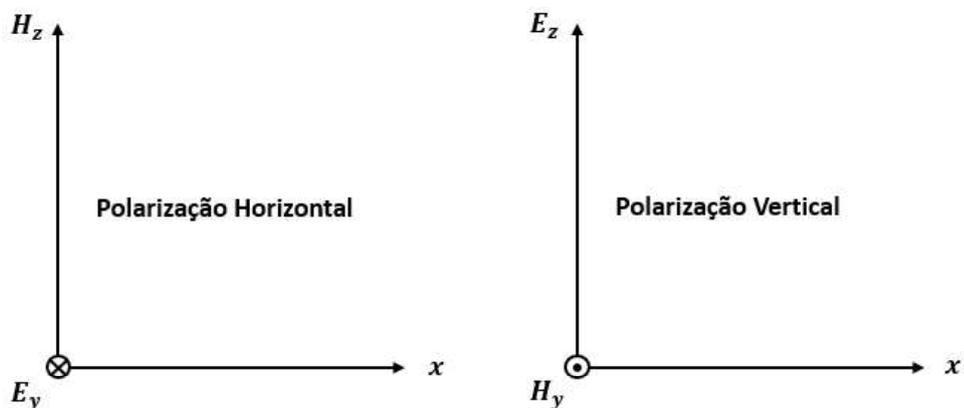
O modelo da Equação Parabólica (PE) é uma aproximação da equação de onda que modela a energia concentrada em um cone, de ângulo central θ , que se propaga, a partir de uma fonte, em uma direção preferencial, também chamada de paraxial. Neste trabalho foi considerada a propagação bidimensional, ou seja, o campo é independente da coordenada y , conforme apresentado na Figura 3.1, onde o eixo das ordenadas representa a altura z e o eixo das abscissas a distância x .

Figura 3.1 - Modo de propagação do modelo PE.



Portanto, a direção de propagação da onda eletromagnética será na direção positiva do eixo x . Suas componentes podem ser decompostas nos modos TE (Transversal Elétrico) ou TM (Transversal Magnético). O primeiro representa a polarização horizontal da onda cujo campo elétrico \vec{E} possui somente a componente não nula $E_y(x, z)$. O segundo configura a polarização vertical, onde o campo magnético \vec{H} possui somente a componente não nula $H_y(x, z)$, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Polarizações da onda eletromagnética.



A formulação numérica do modelo PE é governada pela equação de Helmholtz a qual tem sua origem nas equações de Maxwell no domínio da frequência, que desconsidera a presença de fontes de corrente e cargas no domínio computacional.

Dessa forma, admitindo que o índice de refração do meio varia de forma suave, desconsiderando a curvatura da terra e considerando a variação temporal $\exp(-i\omega t)$, chega-se as seguintes expressões para a solução NAPE [12], Equação (3.1):

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial x} + k^2(n^2(z) - 1) \right] u(x, z) = 0, \quad (3.1)$$

e para solução WAPE [12], Equação (3.2):

$$\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} - \left[ik^{-1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} + 1 \right)^{-1} + ik(n(z) - 1) \right] u(x, z) = 0, \quad (3.2)$$

onde k representa o número de onda,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3.3)$$

$n(z)$ o índice de refração do meio, conforme equação (2.1),

$$n(z) = 1 + 315 \times 10^{-6} \times e^{-z/7350}, \quad (3.4)$$

e $u(x, z)$ uma função auxiliar introduzida para avaliar a propagação do campo,

$$u(x, z) = e^{-ikx} \psi(x, z). \quad (3.5)$$

Na Equação (3.5), $\psi(x, z)$ representa a componente escalar do campo, sendo:

$$\psi(x, z) = E_y(x, z), \quad (3.6)$$

para polarização horizontal, e

$$\psi(x, z) = H_y(x, z), \quad (3.7)$$

para polarização vertical, conforme ilustrado na Figura 3.2.

O método SSFT, utilizado para resolver numericamente o modelo PE, é um algoritmo robusto e bastante utilizado que calcula a propagação do campo em intervalos discretos a partir de um vetor de posições inicial, calculado de acordo com os parâmetros da antena transmissora. Em seguida, o campo calculado a cada passo Δx utiliza como entrada os valores do passo anterior, considerando as condições de contorno adequadas nos limites inferior e superior do domínio computacional, existindo assim uma grande dependência de dados entre as etapas. Esse processo iterativo se repete até atingir o alcance máximo desejado.

Com o objetivo de resolver as Equações (3.1) e (3.2) no domínio espectral, que é mais simples, e retornar para o domínio espacial, o método SSFT utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT), respectivamente. Após o desenvolvimento matemático, o campo para a distância $x + \Delta x$ é calculado através da Equação (3.8) para a solução NAPE e da Equação (3.9) para a solução WAPE [20]:

$$u(x + \Delta x, z) = e^{[ik(n^2(z)-1)\frac{\Delta x}{2}]} F^{-1} \left\{ e^{(-ip^2\frac{\Delta x}{2k})} F\{u(x, z)\} \right\}, \quad (3.8)$$

$$u(x + \Delta x, z) = e^{[ik(n(z)-1)\Delta x]} F^{-1} \left\{ e^{(-ip^2\frac{\Delta x}{k})} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{p}{k}\right)^2} + 1 \right)^{-1} F\{u(x, z)\} \right\}, \quad (3.9)$$

onde, F e F^{-1} representam FFT e IFFT, respectivamente, e p é uma variável definida pela Equação (3.10):

$$p = k \sin \theta, \quad (3.10)$$

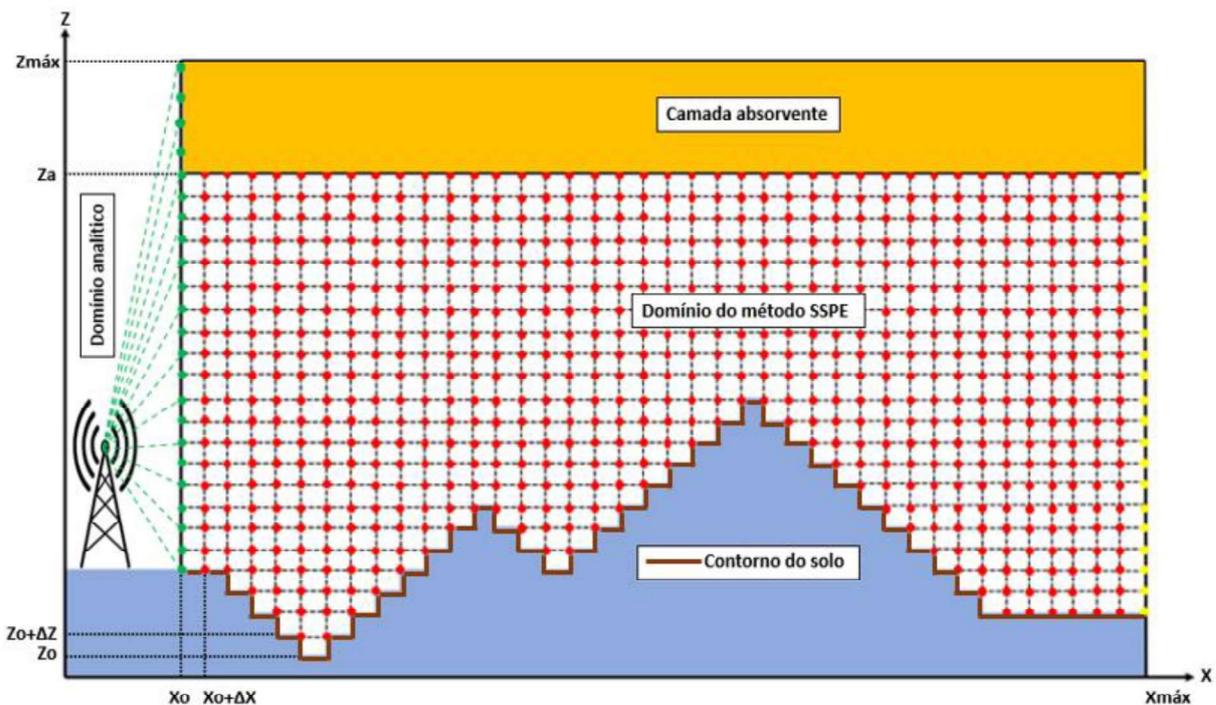
sendo θ o ângulo de propagação.

O incremento Δx é coerentemente escolhido dependendo da extensão do enlace, podendo ser muito maior que o comprimento de onda [20].

3.3 Domínio computacional

A solução numérica do algoritmo SSPE exige algumas condições do ambiente de propagação em análise e por esse motivo são definidas 4 regiões no âmbito computacional: domínio analítico, camada absorvente, contorno do solo e domínio do método SSPE [22], conforme ilustrado pela Figura 3.3, onde os pontos verdes representam o perfil vertical do campo inicial, calculados de forma analítica, e os pontos vermelhos e amarelos o campo calculado utilizando a técnica numérica, sendo que esses últimos representam o perfil vertical do campo final.

Figura 3.3 - Domínios computacionais do algoritmo SSPE.



3.3.1 Domínio analítico

A região denominada domínio analítico, conforme Figura 3.3, compreendida entre $x = 0$ e $x = x_0$, é de fundamental importância e seu principal objetivo é calcular o campo irradiado pela fonte para determinar o campo inicial na posição x_0 . Esse campo formará um vetor complexo que conterà informação de amplitude e fase da onda para cada ponto, separados por Δz . Esses dados serão a base do algoritmo de *split-step*, porque a partir deles será calculado o campo para o restante do ambiente.

Para isso, deve-se conhecer os parâmetros da antena transmissora para que se possa definir de forma analítica o vetor de posições do campo inicial. De acordo com [23], conhecendo a potência irradiada pela fonte e seu ganho em função da direção é possível estimar a intensidade do campo em uma determinada posição na região de campo distante, por meio das Equações (3.11) e (3.12):

$$|\vec{E}(r, \theta, \phi)| \approx \sqrt{\frac{\eta P_{rad} G(\theta, \phi)}{2\pi r^2}}, \quad (3.11)$$

$$|\vec{H}(r, \theta, \phi)| \approx \sqrt{\frac{P_{rad} G(\theta, \phi)}{\eta 2\pi r^2}}, \quad (3.12)$$

onde

$\vec{E}(r, \theta, \phi)$: campo elétrico em coordenadas esféricas;

$\vec{H}(r, \theta, \phi)$: campo magnético em coordenadas esféricas;

η : impedância intrínseca do meio;

P_{rad} : potência radiada pela antena;

$G(\theta, \phi)$: ganho da antena na região de campo distante;

$r = r(z)$: distância da fonte até a posição no perfil vertical do campo inicial.

Para garantir que o campo calculado esteja na região de campo distante, a distância inicial x_0 deverá atender ao critério da Equação (3.13):

$$x_0 > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3.13)$$

onde

D : maior dimensão da antena transmissora;

λ : comprimento de onda.

Portanto, podemos definir o campo inicial através da Equação (3.14):

$$u(x_0, z) = \begin{cases} |\vec{E}| e^{ikr(z)}, & \text{para polarização vertical.} \\ |\vec{H}| e^{ikr(z)}, & \text{para polarização horizontal.} \end{cases} \quad (3.14)$$

3.3.2 Camada absorvente

Como o ambiente de propagação é infinito em relação à altitude é necessário especificar um limite em $z = z_{m\acute{a}x}$, conforme Figura 3.3, porém a condição apresentada pela Equação (3.15) também deve ser atendida [24]:

$$u(x, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0. \quad (3.15)$$

Esse truncamento computacional provoca reflexões não físicas no limite superior, devido à transformada de Fourier no cálculo do campo, que afetam a precisão da solução numérica. Portanto, é necessário amortecer o campo que chega em $z_{m\acute{a}x}$.

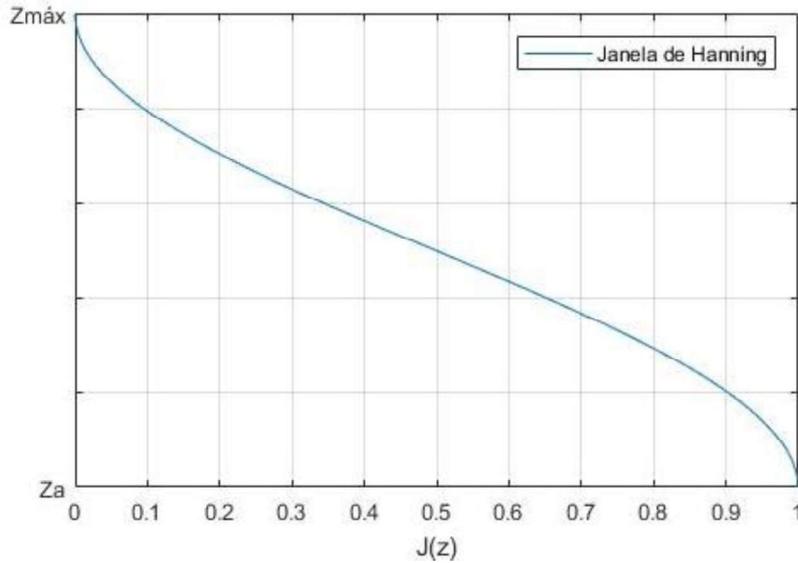
Para isso é inserida uma camada absorvente a partir de $z = z_a$ com o objetivo de atenuar lentamente o campo ascendente, tornando-o aproximadamente igual a zero na fronteira de $z_{m\acute{a}x}$. Deste modo, apenas uma energia desprezível será refletida em direção ao domínio de interesse, não afetando, portanto, a precisão dos resultados do cálculo numérico.

Uma maneira efetiva de implementar camada absorvente é utilizar janela de truncamento, como por exemplo as janelas de: Hanning, Hamming, Kaiser, Tukey e Hanning-Poisson [25]. Neste trabalho será utilizada a Janela de Hanning, definida pela Equação (3.16), onde $z_a \leq z \leq z_{m\acute{a}x}$:

$$J(z) = \frac{1 + \cos\left(\frac{\pi(z - z_a)}{z_{m\acute{a}x} - z_a}\right)}{2}. \quad (3.16)$$

Matematicamente essa equação garante que $J(z_a) = 1$ e $J(z_{m\acute{a}x}) = 0$, conforme Figura 3.4. Dentro desses limites, o campo $u(x, z)$ é multiplicado pela função $J(z)$, efetivando desse modo os resultados almejados na região.

Figura 3.4 - Janela de Hanning em função da altitude.



Neste trabalho a largura da camada absorvente foi estabelecida para metade do domínio computacional, portanto $z_a = z_{máx}/2$.

3.3.3 Contorno do solo

Para parametrizar os efeitos do terreno no ambiente de propagação é necessário realizar a discretização do perfil topográfico, que consiste em transformar a distribuição contínua de dados altimétricos em unidades com valores específicos em um intervalo. Essa transformação do relevo pode ser visualizada na Figura 3.3, onde a discretização é relativa ao perfil da Figura 3.1.

Feito isso, a interface entre o ar e o terreno é chamada de região de contorno do solo. Ela é importante para estimar as atenuações relativas da interação entre as ondas eletromagnéticas que se propagam e o terreno. Para isso, a condição de contorno apresentada pela Equação (3.17) deve ser satisfeita em seu domínio [17]:

$$\left[\alpha_1 \frac{\partial}{\partial z} + \alpha_2 \right] u(x, z) = 0, \quad (3.17)$$

sendo α_1 e α_2 constantes que assumem valores diferentes de acordo com o problema em análise. No caso de uma superfície condutora perfeita, aplica-se as condições de contorno de Dirichlet ou de Neumann, para polarização horizontal ou vertical,

respectivamente [20]. Porém, para muitos problemas não é suficiente considerar a superfície perfeitamente condutora, devendo, portanto, considerar o meio com perdas. Nesse caso, será utilizada a condição de contorno de Cauchy, onde $\alpha_1 = 1$ e α_2 definido pela Equação (3.18):

$$\alpha_2 = \begin{cases} ik\sqrt{\gamma - 1}, & \text{para polarização horizontal} \\ \frac{ik\sqrt{\gamma - 1}}{\gamma}, & \text{para polarização vertical} \end{cases}, \quad (3.18)$$

sendo γ a permissividade relativa complexa do solo, expressa em termos de seus parâmetros eletromagnéticos e pelo comprimento de onda, conforme Equação (3.19):

$$\gamma = \epsilon_r + i60\sigma\lambda. \quad (3.19)$$

A técnica numérica SSPE não consegue manipular automaticamente a condição de contorno da superfície, para isso é incluído em seu algoritmo o método DMFT, desenvolvido por Dockery e Kuttler para terrenos irregulares discretizados [17]. Inicialmente o domínio z é segmentado de acordo com a Equação (3.20):

$$z = m\Delta z, \quad (3.20)$$

onde $m = 0, 1, 2, 3, \dots, N$. O valor do incremento Δz deve satisfazer a Equação (3.21) [12]:

$$\Delta z \leq \frac{\lambda}{2 \times \text{sen}(\theta_{m\acute{a}x})}. \quad (3.21)$$

Esse critério advém do fato que o método SSPE opera entre os domínios z e p , denominados pares recíprocos da transformada de Fourier, referentes às Equações (3.8) e (3.9). Na implementação das formulações numéricas esses domínios são truncados em $z_{m\acute{a}x}$ e $p_{m\acute{a}x}$. Para evitar efeitos de *aliasing* é aplicado o critério de Nyquist, apresentado pela Equação (3.22):

$$z_{m\acute{a}x} \times p_{m\acute{a}x} = \pi N . \quad (3.22)$$

Substituindo as Equações (3.10) e (3.20) em (3.22), chega-se à Equação (3.21), que limita o passo Δz . Nesse momento, cabe ressaltar que o passo Δx pode ser escolhido livremente, porém de maneira coerente com a extensão do enlace, podendo ser muito maior que o comprimento de onda.

Como o algoritmo calcula a função auxiliar do campo posterior utilizando como entrada os dados do passo anterior, o processo pode ser dividido em três etapas: primeiramente é aplicada a DMFT na função $u(x, m\Delta z)$, levando a solução numérica para o domínio p ; em seguida são determinados os valores do passo seguinte, ainda no domínio p ; e finalmente utiliza a DMFT inversa nos resultados para obter a função $u(x + \Delta x, m\Delta z)$, retornando a solução para o domínio z . Desse modo, o resultado final é alcançado por meio da Equação (3.23):

$$u(x + \Delta x, m\Delta z) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^N U(x + \Delta x, l\Delta p) \frac{\alpha_2 \text{sen} \left(\frac{\pi l m}{N} \right) - \frac{\text{sen} \left(\frac{\pi l}{N} \right)}{\Delta z} \cos \left(\frac{\pi l m}{N} \right)}{\alpha_2^2 + \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{\pi l}{N} \right)}{\Delta z} \right]^2} \quad (3.23)$$

$$+ U(x + \Delta x, 0)r^m + U(x + \Delta x, N\Delta p)(-r)^{N-m} ,$$

onde $U(x + \Delta x, 0)$, $U(x + \Delta x, l\Delta p)$ e $U(x + \Delta x, N\Delta p)$ representam os resultados da segunda etapa, e são representados pelas Equações (3.24), (3.25) e (3.26):

$$U(x + \Delta x, 0) = \exp \left[\frac{i\Delta x}{2k} \left(\frac{\log r}{\Delta z} \right)^2 \right] U(x, 0) , \quad (3.24)$$

$$U(x + \Delta x, l\Delta p) = \exp \left[i\Delta x \left(\sqrt{k^2 - (l\Delta p)^2} - k \right) \right] U(x, l\Delta p) , \quad (3.25)$$

$$U(x + \Delta x, N\Delta p) = \exp \left[\frac{i\Delta x}{2k} \left(\frac{\log(-r)}{\Delta z} \right)^2 \right] U(x, N\Delta p) , \quad (3.26)$$

sendo $U(x, 0)$, $U(x, l\Delta p)$ e $U(x, N\Delta p)$ os resultados decorrentes da primeira etapa, e são representados pelas Equações (3.27), (3.28) e (3.29):

$$U(x, 0) = A \sum_{m=0}^N r^m u(x, m\Delta z), \quad (3.27)$$

$$U(x, l\Delta p) = A \sum_{m=0}^N u(x, m\Delta z) \left[\alpha_2 \operatorname{sen} \left(\frac{\pi l m}{N} \right) - \frac{\operatorname{sen} \left(\frac{\pi l}{N} \right)}{\Delta z} \cos \left(\frac{\pi l m}{N} \right) \right], \quad (3.28)$$

$$U(x, N\Delta p) = A \sum_{m=0}^N (-r)^{N-m} u(x, m\Delta z). \quad (3.29)$$

Para as Equações (3.22) até (3.28) temos algumas definições [17], apresentadas nas Equações (3.30), (3.31) e (3.32):

$$l = 1, 2, 3 \dots, N - 1, \quad (3.30)$$

$$A = \frac{2(1 - r^2)}{(1 + r^2)(1 - r^{2N})}, \quad (3.31)$$

$$r = \begin{cases} \sqrt{1 + (\alpha_2 \Delta z)^2} - \alpha_2 \Delta z, & \text{para polarização vertical} \\ -\sqrt{1 + (\alpha_2 \Delta z)^2} - \alpha_2 \Delta z, & \text{para polarização horizontal} \end{cases}, \quad (3.32)$$

como também a amplitude de Δp deve satisfazer a seguinte igualdade: $\Delta p \Delta z = \pi/N$. Nos somatórios referentes às Equações (3.27), (3.28) e (3.29) usa-se um fator ponderado igual a 0,5 para o primeiro e último termo da sequência, ou seja, quando $m = 0$ e $m = N$.

3.3.4 Domínio do método SSPE

Essa região, que representa a área de interesse do observador, utiliza a solução numérica SSPE para calcular a distribuição do campo no ambiente de

propagação. Ela se estende no domínio vertical de $z = z_o$ até $z = z_a$ e no horizontal de $x = x_o$ até $x = x_{máx}$, conforme ilustrado pela Figura 3.3.

A aplicação do algoritmo consiste em um processo iterativo que calcula passo a passo, Δx e Δz , o campo ao longo do meio na direção de propagação através das Equações (3.8) e (3.9). Por intermédio do método DMFT, Equação (3.23), é possível incluir as atenuações do solo nas funções auxiliares do campo, as quais consideram os efeitos atmosféricos.

Após obter os valores de $u(x, z)$ em todo o domínio computacional é possível calcular dois parâmetros de grande interesse em aplicações de radiopropagação. O primeiro é a atenuação ao longo do caminho de propagação, do termo em inglês *Path Loss* (PL), que representa a razão entre a potência radiada pela antena transmissora e a potência disponível em uma coordenada do ambiente, sendo representada pela Equação (3.33) [20]:

$$PL(x, z) = -20 \log|u(x, z)| + 20 \log(4\pi) + 10 \log(x) - 30 \log(\lambda). \quad (3.33)$$

O segundo parâmetro é a potência recebida (Pr) na localização escolhida, obtida através da Equação (3.34) [26]:

$$Pr(x, z) = 20 \log \left(\left| \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x}} u(x, z) e^{ikx} \right| \right). \quad (3.34)$$

Em ambas equações os resultados são expressos em dB.

CAPÍTULO 4 - CAMPANHA DE MEDIÇÕES

4.1 Ambiente de estudo

O sistema de transporte metroferroviário da cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, possui cerca de 28 km de extensão e 19 estações para embarque e desembarque de passageiros. A Tabela 4.1 informa o nome de cada uma dessas estações e suas respectivas localizações geográficas, também ilustradas na Figura 4.1, que serão importantes para se definir os enlaces.

Seu sistema de radiocomunicação é analógico desde a sua implantação em 1984, porém a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) alertou a STU/BH sobre a necessidade de migrar para um sistema digital em 2017, o que motivou a CBTU a contratar os serviços da empresa GAP Service Ltda [27] para executar essa modernização.

Em 2019 realizou-se um estudo de radiopropagação para mensurar a cobertura desse novo sistema ao longo da via férrea. Na etapa de *site survey*, foram definidos 8 locais que seriam candidatos a receberem as Estações Rádio Base (ERB), conforme Tabela 4.2. No *drive test* foi instalado um sistema de transmissão nesses locais, e um sistema de recepção foi acomodado no trem, armazenando informações georreferenciadas de potência recebida enquanto se deslocava pela via, representada pela linha vermelha nas Figuras 4.1 e 4.2.

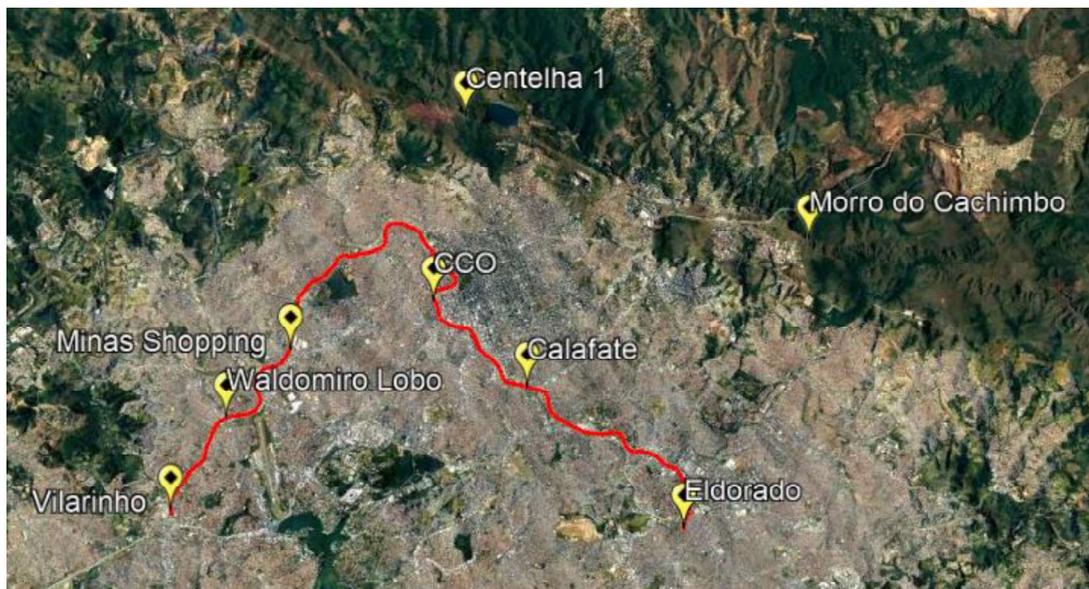
Figura 4.1 - Visualização das estações e linha férrea do metrô.



Tabela 4.1 - Estações de metrô e suas localizações geográficas.

Nome da estação	Latitude	Longitude
Vilarinho	19°49'18.14"S	43°56'51.31"O
Floramar	19°50'2.12"S	43°56'25.56"O
Waldomiro Lobo	19°50'52.04"S	43°55'57.59"O
Primeiro de Maio	19°51'28.20"S	43°56'1.92"O
São Gabriel	19°51'47.65"S	43°55'34.55"O
Minas Shopping	19°52'20.52"S	43°55'31.10"O
José Cândido	19°53'0.72"S	43°54'46.67"O
Santa Inês	19°53'42.88"S	43°54'37.94"O
Horto	19°54'21.99"S	43°54'47.06"O
Santa Tereza	19°55'4.45"S	43°54'45.72"O
Santa Efigênia	19°55'10.19"S	43°55'20.01"O
Central	19°55'0.00"S	43°55'58.00"O
Lagoinha	19°54'46.78"S	43°56'32.98"O
Carlos Prates	19°55'2.85"S	43°57'23.68"O
Calafate	19°55'20.22"S	43°58'12.93"O
Gameleira	19°55'41.11"S	43°59'17.94"O
Vila Oeste	19°56'19.06"S	44° 0'9.80"O
Cidade Industrial	19°56'43.81"S	44° 0'59.27"O
Eldorado	19°56'19.46"S	44° 1'45.52"O

Figura 4.2 - Visualização dos pontos de transmissão e linha férrea do metrô.



O sistema de transmissão utilizou uma antena monopolo vertical plano terra, com 8,15 dBi de ganho, conectada a uma repetidora bidirecional para rádio digital com capacidade máxima para potência de transmissão de 50 W. As especificações dos equipamentos podem ser visualizadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Equipamentos do sistema de transmissão.

Equipamento	Marca	Modelo
Antena colinear plano terra	ARS	G-6A
Duplexador	ARS	DVM-6
Repetidora	Motorola	SLR5100
Cabo coaxial	RFS	RG213/C

O sistema de coleta de dados utilizou a aplicação MOTOTRBO Site Survey [28], que ajuda a analisar a cobertura de sinal em um site, com o objetivo de obter a melhor performance para rádios móveis e portáteis. Para o seu uso é necessário que um rádio esteja ligado a um computador para armazenar as amostras de RSSI (*Received Signal Strength Indication*), em dBm, com as correspondentes coordenadas geográficas. A Figura 4.3 ilustra esse cenário de coleta de informações e as especificações dos equipamentos utilizados podem ser visualizadas na Tabela 4.3.

Figura 4.3 - Esquemático do sistema de transmissão e recepção.



Fonte: Manual do *software* MOTOTRBO Site Survey [28].

Tabela 4.3 - Equipamentos do sistema de recepção.

Equipamento	Marca	Modelo
Rádio portátil	Motorola	DGP8550
Notebook	Sony	Vaio i5
Cabo	Motorola	USB
<i>Software</i> de medição	Motorola	MOTOTRBO Site Survey

4.2 Metodologia

A metodologia utilizada foi a seguinte: o sistema de transmissão foi configurado para operar na frequência de 163,94625 MHz com 20 W de potência e o sistema de recepção para registrar o nível de sinal recebido a cada 10 segundos, durante o deslocamento do trem ao longo da via, sendo que em cada estação no trecho era realizada uma parada para embarque e desembarque dos passageiros. É importante destacar que os equipamentos de recepção estavam no interior do trem, em uma cabine frontal onde estavam o maquinista e o responsável por executar o teste.

O *software* de medição foi configurado para armazenar valores de data, hora, latitude, longitude, altitude, nível de sinal GPS e RSSI. As medições foram exportadas em arquivos de extensão .CSV (que podem ser visualizados através do *software* Excel), e .KML (que podem ser visualizados através do *software* Google Earth). A intensidade de RSSI armazenada em cada ponto foi caracterizada com o seguinte código de cores nos arquivos .KML:

- Azul para sinais maiores que -100 dBm;
- Verde para sinais entre -100 dBm e -105 dBm;
- Amarelo para sinais entre -105 dBm e -110 dBm;
- Laranja para sinais entre -110 dBm e -115 dBm;
- Vermelho para sinais menores que -115 dBm.

4.3 Medições

No Anexo A encontram-se os resultados do *drive test* com a repetidora instalada nos 8 locais de transmissão. Foram coletadas um total de 1465 medições, porém a grande maioria com o trem em movimento, uma vez que existem apenas 19 estações no trajeto completo da via. No Capítulo 6 serão analisados os 88 pontos de

coleta em que o sistema de recepção se encontrava parado em relação à repetidora, ou seja, nas estações. A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos testes.

Tabela 4.4 - Resumo dos testes da campanha de medições.

Local da repetidora	Início do teste	Fim do teste	Medições
Minas Shopping	Estação Vilarinho	Estação Calafate	245
CCO	Estação Santa Inês	Estação Vila Oeste	150
Morro do Cachimbo	Estação Vilarinho	Estação Eldorado	300
Vilarinho	Estação Vilarinho	Estação Minas Shopping	80
Centelha 1	Estação Vilarinho	Estação Eldorado	320
Eldorado	Estação Eldorado	Estação Calafate	120
Calafate	Estação Lagoinha	Estação Cidade Industrial	100
Waldomiro Lobo	Estação Vilarinho	Estação Santa Inês	150

Como exemplo, com a repetidora instalada em Centelha 1, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Vilarinho e terminou com sua chegada na Estação Eldorado. A antena transmissora foi instalada em um mastro numa altura de 3 metros do solo, conforme Figura 4.5, e foram coletadas um total de 320 medições, que podem ser visualizadas através da Figura 4.4.

Figura 4.4 - Amostras do nível de sinal recebido com a repetidora em Centelha 1.

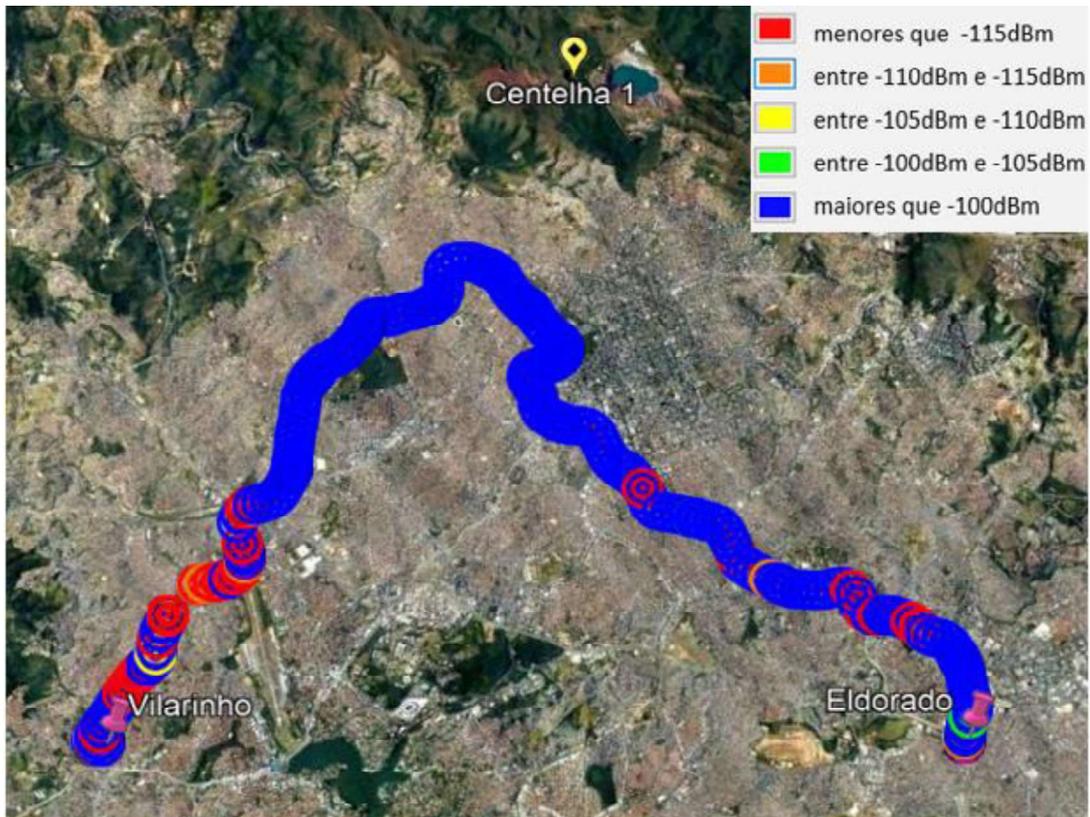
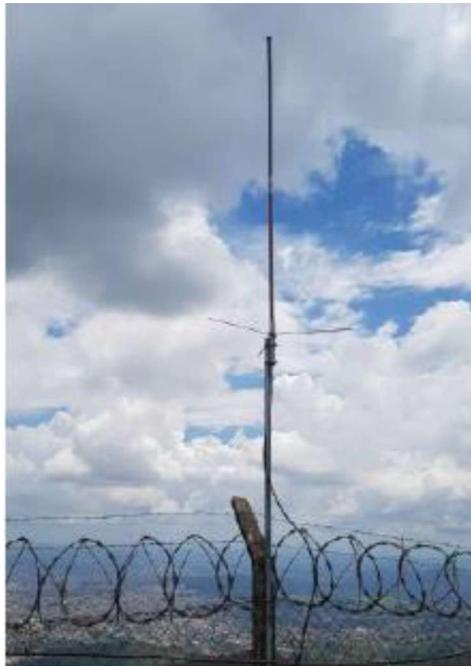


Figura 4.5 - Equipamentos do sistema de transmissão instalado em Centelha 1.

(a) Antena transmissora fixada em um mastro.



(b) Repetidora e duplexador instalados em um gabinete.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO

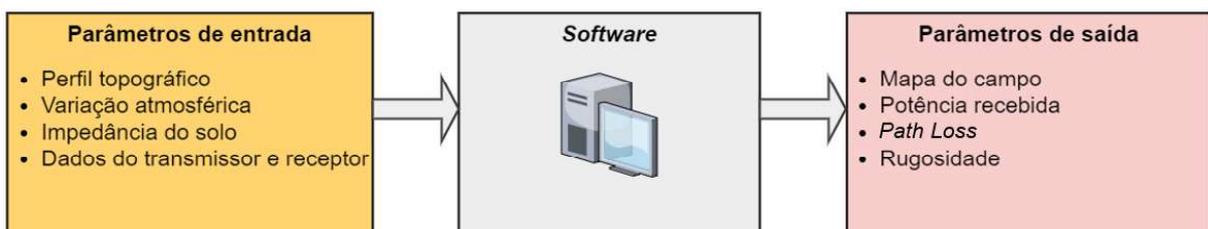
A proposta deste trabalho foi aperfeiçoar uma ferramenta computacional de predição de cobertura radioelétrica para que fosse aplicável em situações de utilização práticas, que utilizam equipamentos de transmissão e recepção comerciais em ambiente de propagação realístico. O algoritmo principal utiliza o método DMFT-SSPE e foi inteiramente implementado utilizando o *software* MATLAB R2017a, em um estudo desenvolvido pelo GAPTEM [2].

5.1 Programa desenvolvido

Para alcançar esses objetivos foi necessário desenvolver duas metodologias de extração de dados: a primeira aplica-se aos diagramas de radiação das antenas, utilizando como fonte de informação o *datasheet* fornecido pelos fabricantes; a segunda aplica-se ao perfil topográfico entre o transmissor e o receptor, utilizando como fonte de dados os modelos digitais de elevação da missão SRTM. Em ambas situações, os dados adquiridos são inseridos no código de maneira automática através de documentos de texto com extensão *.txt*, e as metodologias serão apresentadas nas subseções 5.2.1 e 5.2.2 deste capítulo.

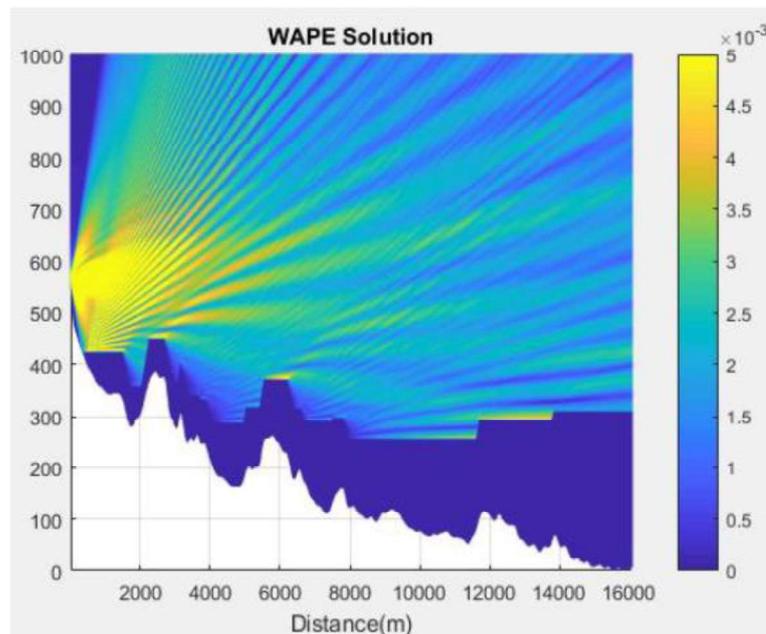
Além disso, com o intuito de auxiliar o usuário a analisar os resultados fornecidos pelo algoritmo, foram implementadas funções para calcular três parâmetros de grande interesse em radiopropagação: a rugosidade do perfil de elevação, a atenuação ao longo do caminho de propagação e o nível de potência recebida. Também foi desenvolvida uma nova interface gráfica para apresentação da distribuição dos valores de campo no domínio de interesse. A Figura 5.1 apresenta um esquemático de entradas e saídas da aplicação elaborada neste trabalho.

Figura 5.1 - Esquemático do programa de predição de cobertura.



Nas primeiras simulações, o algoritmo principal não obteve boa resposta ao processar os perfis topográficos realísticos, ocasionando instabilidade numérica, que provocava erro de compilação, e criando regiões de falsa sombra eletromagnética. Essa situação é apresentada pela Figura 5.2 que ilustra esse cenário ao compilar o enlace entre Morro do Cachimbo e Estação Minas Shopping, onde a região na cor branca indica o perfil topográfico e na cor azul escuro uma região de campo nulo.

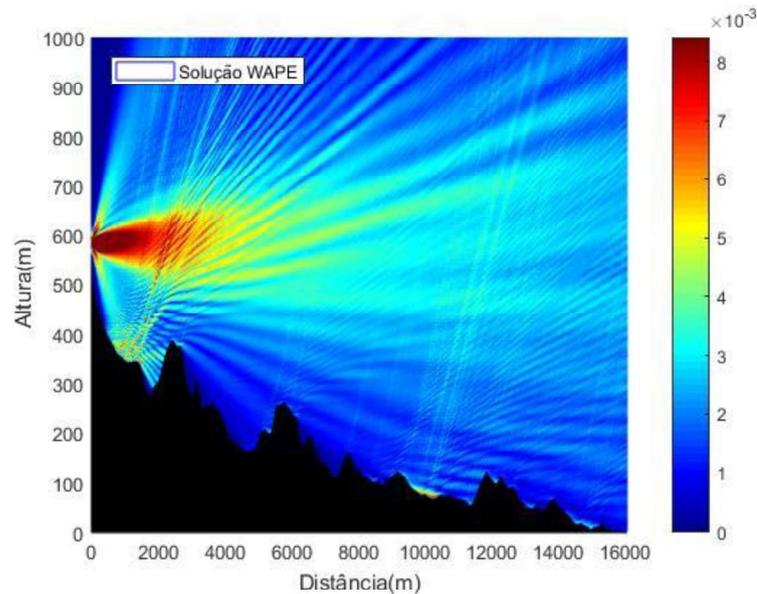
Figura 5.2 - Mapa do campo com falsa região de campo nulo.



A causa desse erro de processamento era uma deficiência do algoritmo em deslocar o vetor de posições do campo no *split-step* quando a inclinação do terreno era acentuada. Isso ocorreu devido à utilização de funções de arredondamento e comparações lógicas com valores da altitude original do relevo ao invés de usar dados do perfil discretizado. Para sanar esses problemas foi necessário substituir alguns trechos do código e criar uma função de rastreamento da superfície do solo discretizado, que se tornou a base lógica dos deslocamentos ascendentes e descendentes do perfil vertical de campo.

Após implementar as modificações, o enlace anterior foi novamente compilado, utilizando os mesmos parâmetros de entrada, e os novos resultados para distribuição do campo são mostrados na Figura 5.3, através da nova interface gráfica desenvolvida, onde a cor preta indica o perfil topográfico.

Figura 5.3 - Mapa do campo com processamento correto.



5.2 Parâmetros de entrada

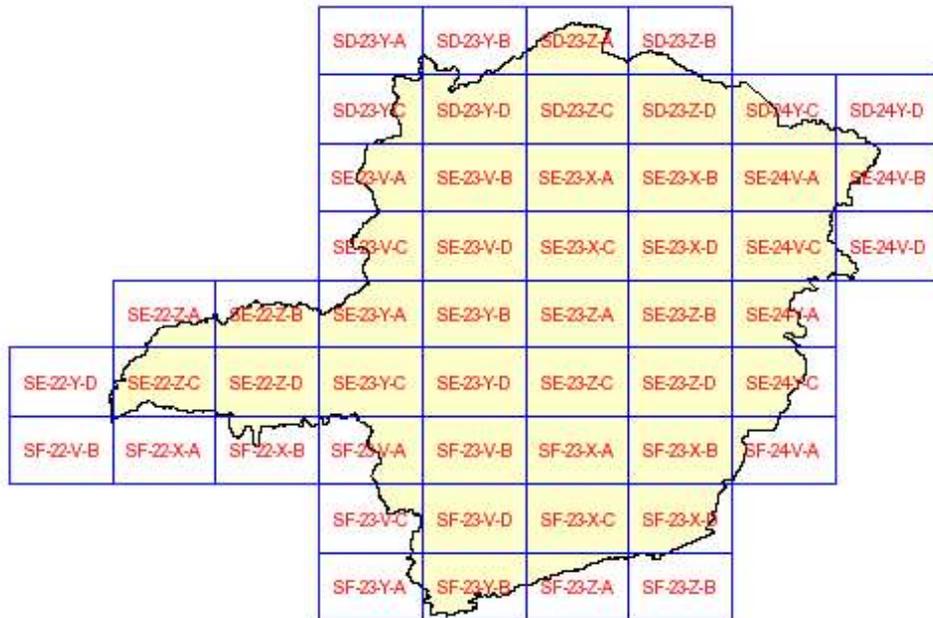
Conforme apresentado no Capítulo 3, a variação atmosférica seguiu o equacionamento proposto pela recomendação ITU-R P.453-14 [5], que define a variação do índice de refração para atmosfera padrão, e a impedância do solo será caracterizada com parâmetros eletromagnéticos de um solo do tipo médio, Tabela 2.2.

5.2.1 Perfil topográfico

Os dados de altimetria dos terrenos, referentes aos enlaces analisados, foram obtidos através dos arquivos disponibilizados pela Embrapa-Monitoramento por Satélite [7], através do projeto Brasil em Relevo. Os modelos digitais de elevação possuem resolução espacial de 90 metros e sistema de coordenadas geográficas WGS-84. Para obter os perfis topográficos deste trabalho foram utilizadas as cartas SF-23-X-A e SE-23-Z-C, que podem ser visualizadas na Figura 5.4.

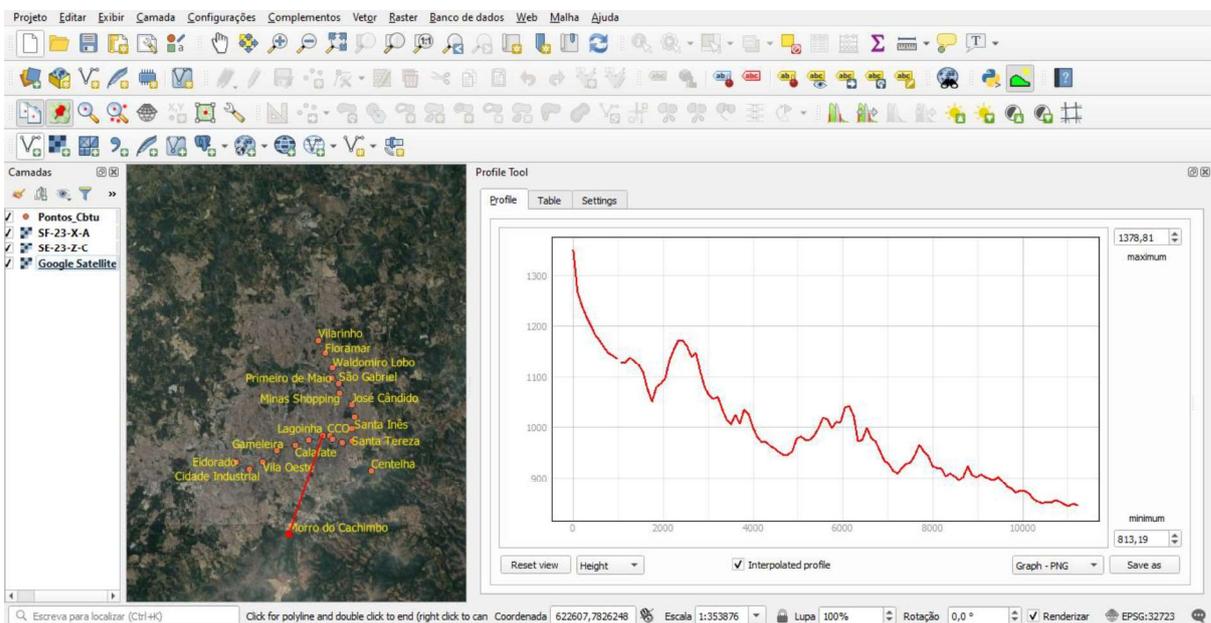
Como os dados destes arquivos são os originais da missão SRTM, sua utilização exige o emprego de *softwares* de geoprocessamento. O programa escolhido para ser utilizado neste estudo foi o Quantum GIS [29], popularmente conhecido como QGIS, por ser um *software* aberto e de grande utilização nos meios públicos e acadêmicos.

Figura 5.4 - Cartas topográficas para o estado de Minas Gerais [7].



Além dos dados de altimetria das cartas, foram adicionadas no projeto, desenvolvido no QGIS, imagens de alta resolução por satélite da biblioteca do Google Maps e também os pontos referentes as localizações das repetidoras e das estações de metrô, para definir os perfis de elevação dos enlaces ponto a ponto analisados. A Figura 5.5 ilustra esse projeto e apresenta o perfil de elevação para o enlace entre Morro do Cachimbo e Estação Lagoinha.

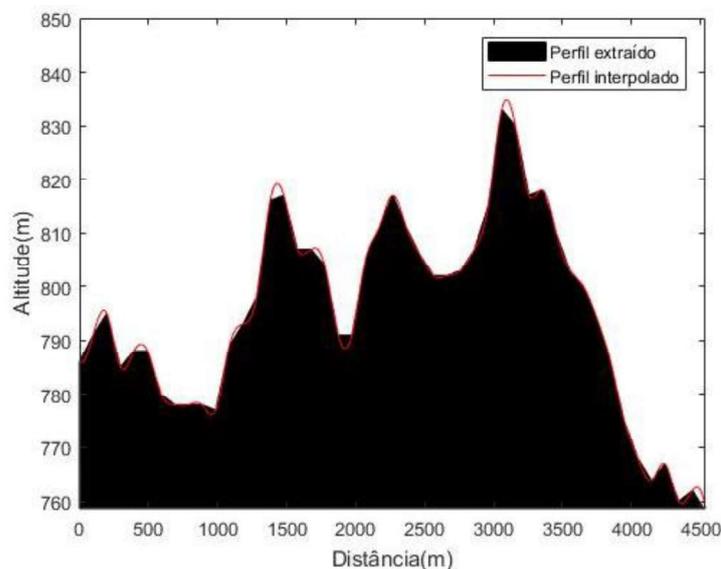
Figura 5.5 - Projeto utilizando o QGIS para extração da altimetria dos enlaces.



As informações de altitude são exportadas pelo QGIS e inseridas no código do programa em MATLAB através de um arquivo de texto *.txt* composto por 2 colunas: a primeira especifica a distância horizontal (x) e a segunda a altitude do relevo (z). Essas variáveis possuem resolução espacial de 90 metros, em consonância com as características das cartas, o que provoca irregularidades abruptas no traçado do perfil topográfico.

Com o objetivo de obter irregularidades mais suaves no terreno, mas sem descaracterizá-los, os pares ordenados altura versus distância foram interpolados através do método numérico Spline Cúbico, o que permite reduzir a resolução espacial para um valor desejado e obter valores de altitude mais fiéis as tendências do perfil. Neste trabalho, esse valor foi definido igual a 12 metros, que representa o passo horizontal (Δx) no algoritmo SSPE. As diferenças entre os dados originais das cartas e os interpolados podem ser visualizadas através da Figura 5.6, que representa o enlace entre Minas Shopping e Estação Floramar.

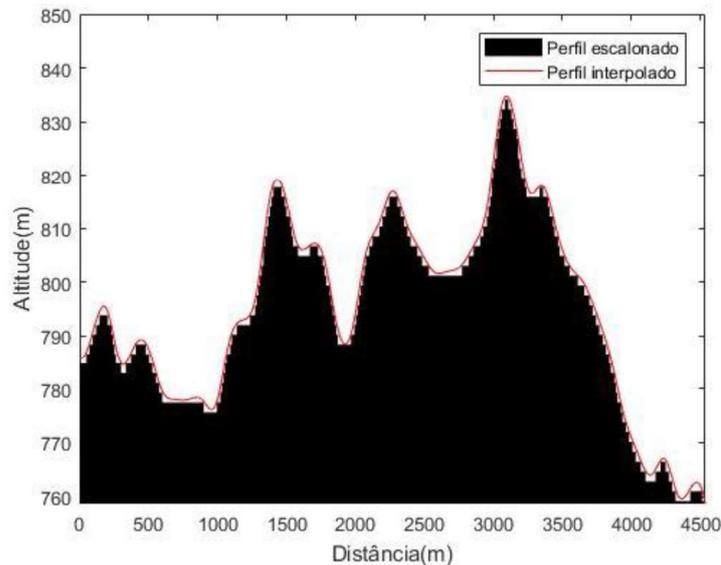
Figura 5.6 - Comparação entre dados de altimetria originais e interpolados.



Conforme mencionado no Capítulo 3, a solução fornecida pelo algoritmo DMFT-SSPE resolve problemas de radiopropagação em terrenos irregulares, porém eles devem ser modelados para serem convenientemente processados pelo algoritmo. Uma técnica eficaz para modelar o terreno é através de escalonamento [18], portanto, o perfil utilizando os dados interpolados foi discretizado em relação a altitude com

intervalos entre amostras de 12 metros, sendo a mesma resolução espacial anterior. Os resultados podem ser comparados através da Figura 5.7.

Figura 5.7 - Comparação entre dados de altimetria interpolados e escalonados.



5.2.2 Transmissor e receptor

A representação gráfica das propriedades de radiação de uma antena em função das coordenadas espaciais recebe o nome de diagrama de radiação, que na maioria dos casos é determinado na região de campo distante. Essas propriedades incluem a intensidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização. Porém, a de maior interesse é a distribuição bi ou tridimensional de energia radiada em função da posição do observador ao longo de um percurso ou superfície de raio constante [23].

Através do diagrama de radiação da antena transmissora, na polarização vertical, utilizada no *drive test*, acessível por meio do *datasheet* fornecido pelo fabricante, foi possível extrair seu ganho em função das coordenadas espaciais, por meio da ferramenta computacional WebPlotDigitizer [30]. Esse *software* é gratuito e bastante utilizado no meio acadêmico em pesquisas que necessitam extrair dados numéricos de gráficos, imagens ou mapas de forma semiautomática. Na Figura 5.8 (a) os pontos na cor vermelha indicam as posições das coordenadas polares que serão extraídas do diagrama e na Figura 5.8 (b) os valores correspondentes destes pontos.

Esses valores foram exportados para um arquivo de texto *.txt* e carregados no *software* desenvolvido. Como trata-se de uma ferramenta semiautomática, que o usuário escolhe manualmente os pontos que deseja extrair, foi necessário aplicar uma técnica de interpolação com o objetivo de reduzir a resolução espacial e suavizar as curvas do diagrama, de forma a melhorar sua aproximação em relação ao original da antena, conforme Figura 5.8 (c).

Essa técnica de extração e interpolação de dados torna-se vantajosa na medida em que algumas antenas possuem diagrama de radiação complexo e seu equacionamento e implementação computacional, para extrair o valor do ganho em função da direção, demandaria muito tempo, o que é facilmente alcançado utilizando essa metodologia.

Como os parâmetros do diagrama de radiação da antena e o equacionamento do perfil vertical do campo inicial, utilizando a Equação (3.14), possuem como premissa estarem na região de campo distante, através da Equação (3.13) foi possível calcular a distância mínima para satisfazer esse critério:

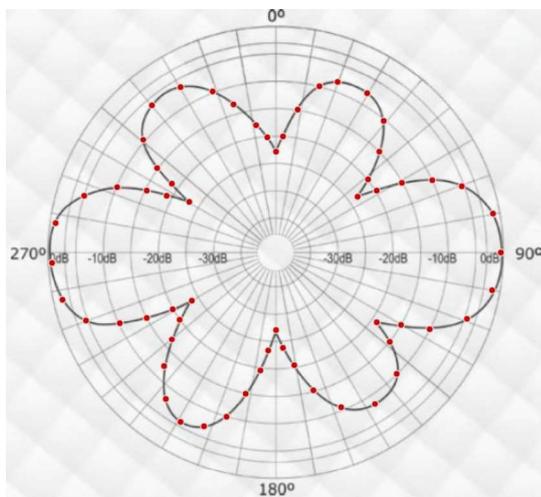
$$x_0 > \frac{2 \times 3,22^2}{1,8292} > 11,3365 \text{ metros.}$$

Sendo assim, o valor de x_0 escolhido para as simulações neste trabalho será de 12 metros.

Na recepção foi utilizado o mesmo princípio para determinar a potência recebida a partir do perfil vertical do campo final do enlace, representado pelos pontos na cor amarela da Figura 3.3. Através do diagrama de radiação da antena receptora, na polarização vertical, utilizada no *drive test*, acessível por meio do *datasheet* fornecido pelo fabricante, foi possível extrair o ganho em função das coordenadas espaciais, utilizando as mesmas técnicas utilizadas com a antena transmissora, como pode ser visualizado por meio da Figura 5.9.

Figura 5.8 - Extração de dados do diagrama de radiação da antena transmissora.

(a) Localização dos pontos escolhidos.



(b) Tabela com os valores das coordenadas polares dos pontos.

Variables: r, θ

-23,489717876082857;	55,06771601573395
-21,757715394206556;	56,83985576821634
-20,009695389142287;	58,327546123009554
-18,02955165904167;	59,45434240658426
-16,260384136500416;	60,542478424363324
-15,123251174081924;	61,13178566069837
-13,417021834763911;	62,29011000528994
-11,413517690716148;	63,5890879857647
-9,386421343238183;	65,36246868352745
-7,369522983287249;	67,7693437703967
-5,750458143274112;	69,64193221377269
-4,197808352963268;	71,81601183110371
-3,345117006468372;	74,23761411809369
-2,4269633726669952;	76,54995253929799
-1,6363404812315507;	78,93347613536673
-0,9127567265485423;	80,96370559436009
-0,337588389991646;	83,33450331957495

Copy to Clipboard Download .CSV Graph in Plotly* Close

(c) Comparação entre os diagramas com os dados extraídos e interpolados.

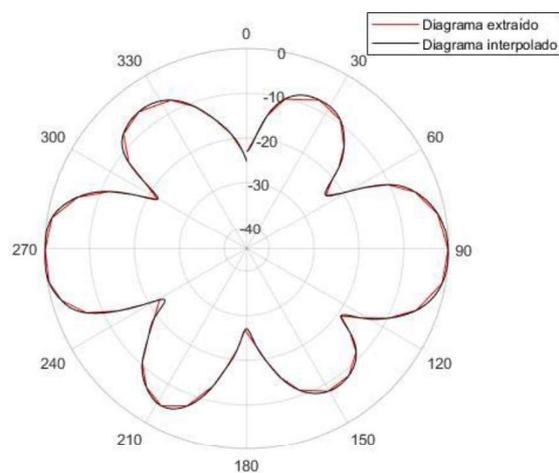
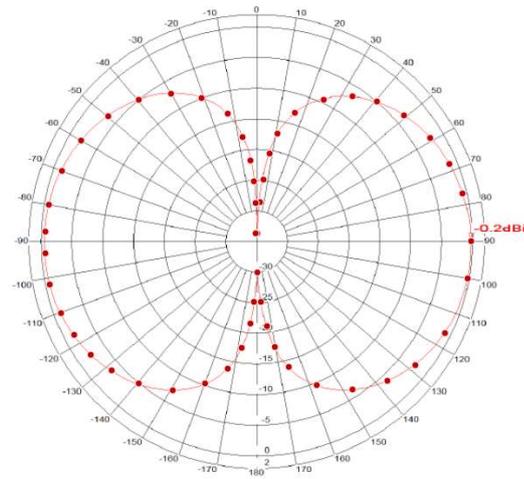
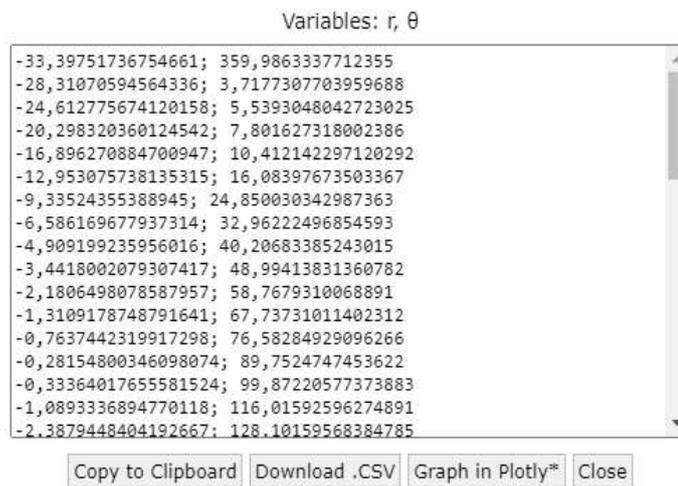


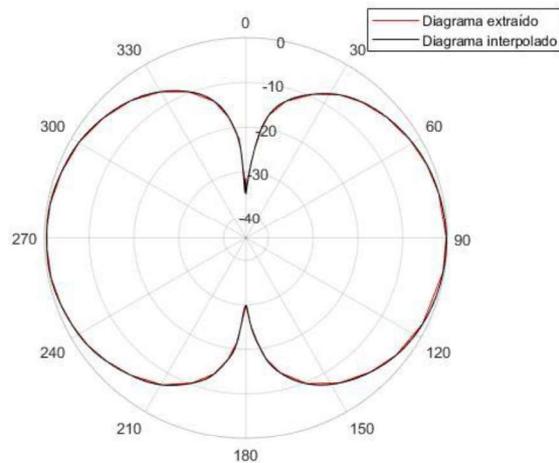
Figura 5.9 - Extração de dados do diagrama de radiação da antena receptora.
(a) Localização dos pontos escolhidos.



(b) Tabela com os valores das coordenadas polares dos pontos.



(c) Comparação entre os diagramas com os dados extraídos e interpolados.



5.3 Parâmetros de saída

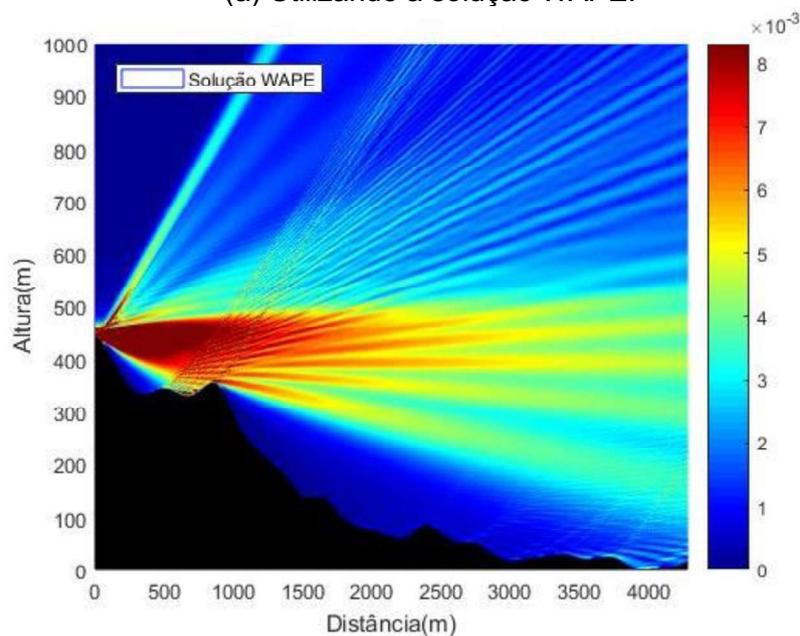
Para auxiliar o usuário a analisar os resultados fornecidos pelo algoritmo, o programa fornece os seguintes parâmetros: mapa do campo em todo ambiente de análise, nível de potência recebida no local de interesse, atenuação ao longo do caminho de propagação entre transmissor e receptor e a rugosidade do perfil de elevação.

5.3.1 Mapa do campo

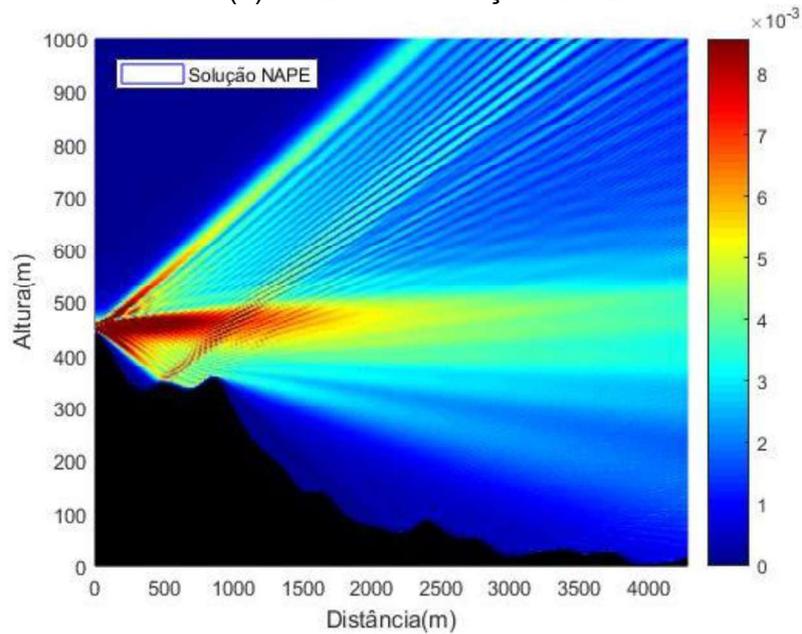
A distribuição espacial do campo no ambiente de propagação pode ser analisada por meio das Figuras 5.10 (a) e (b), onde são apresentados os resultados para o enlace entre Centelha 1 e Estação Santa Efigênia. A grande vantagem desses gráficos é poder observar a intensidade do sinal em todos os pontos no cenário e também analisar a influência dos obstáculos, que terá relevante impacto devido às características angulares das soluções NAPE e WAPE.

Observa-se que a WAPE ilumina mais intensamente os obstáculos próximos ao sistema irradiante e por consequência provoca maiores reflexões e difrações, o que influenciará no nível de sinal recebido no ponto escolhido. Nesse sentido, como o enlace analisado é ponto a ponto, observa-se que a região final do relevo foi melhor iluminada utilizando WAPE, o que resulta em um campo mais intenso no receptor.

Figura 5.10 - Mapa do campo para o enlace entre Centelha 1 e Estação Santa Efigênia.
(a) Utilizando a solução WAPE.



(b) Utilizando a solução NAPE.

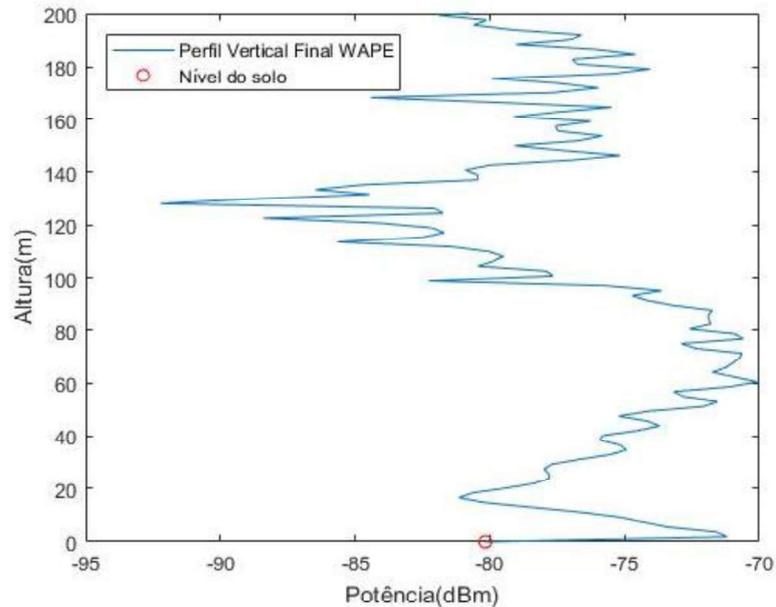


5.3.2 Potência recebida

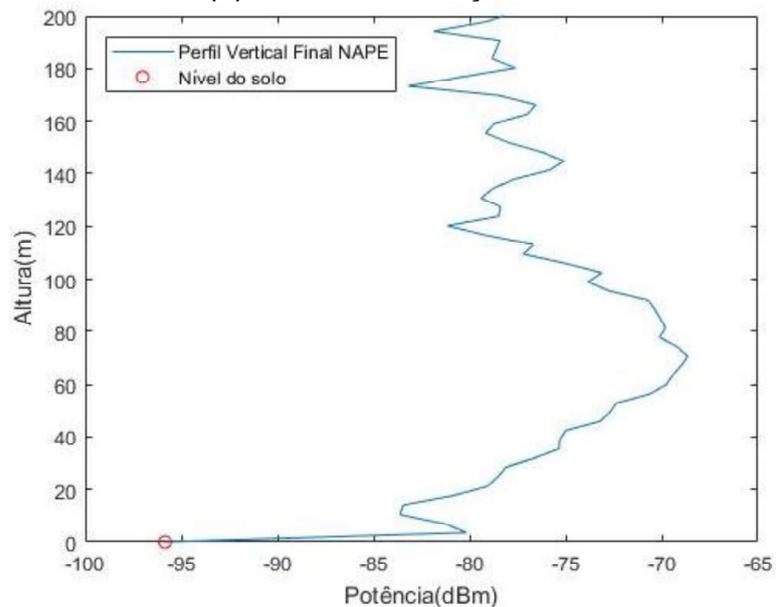
Na elaboração de projetos de radioenlaces é necessária uma atenção especial para a curvatura da terra e para liberação parcial ou total da primeira zona de Fresnel, de acordo com a faixa de frequência utilizada e a distância do enlace. Sendo assim, a infraestrutura vertical onde serão instaladas as antenas é um parâmetro muito importante. Sua altura é escolhida de maneira a se obter um certo nível de potência que atenda a sensibilidade do sistema de recepção para que esse tenha uma boa performance.

Por isso, um dos resultados de saída do *software* desenvolvido é o perfil vertical do nível de potência no ponto desejado. Através das Figuras 5.11 (a) e (b) é possível avaliar qual altura atende aos critérios de intensidade de sinal, servindo como referência para instalação do sistema de recepção em torre de telecomunicações, topo de um prédio local ou em mastros de fixação.

Figura 5.11 - Perfil de potência recebida no enlace entre Calafate e Estação Lagoinha.
(a) Utilizando a solução WAPE



(b) Utilizando a solução NAPE



5.3.3 Atenuação ao longo do caminho de propagação

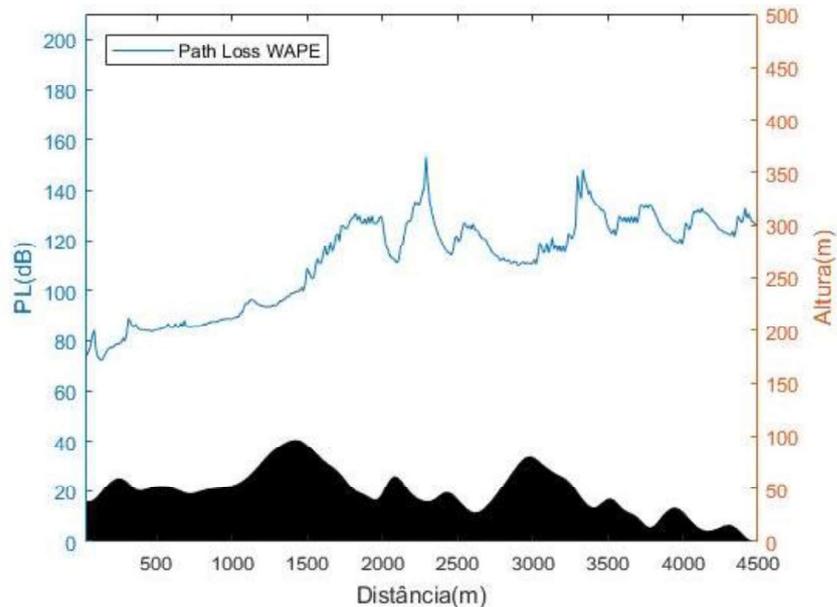
Idealisticamente, os engenheiros de telecomunicações sonham em ter ferramentas computacionais que calculam precisamente a atenuação entre quaisquer dois pontos identificados em um mapa, representando um transmissor e um receptor. Isso requer que a solução da onda eletromagnética seja avaliada em três dimensões de maneira que leve em consideração vários fatores, tais como: terreno irregular, vegetação, curvatura da terra, refração atmosférica, presença de edifícios, carros,

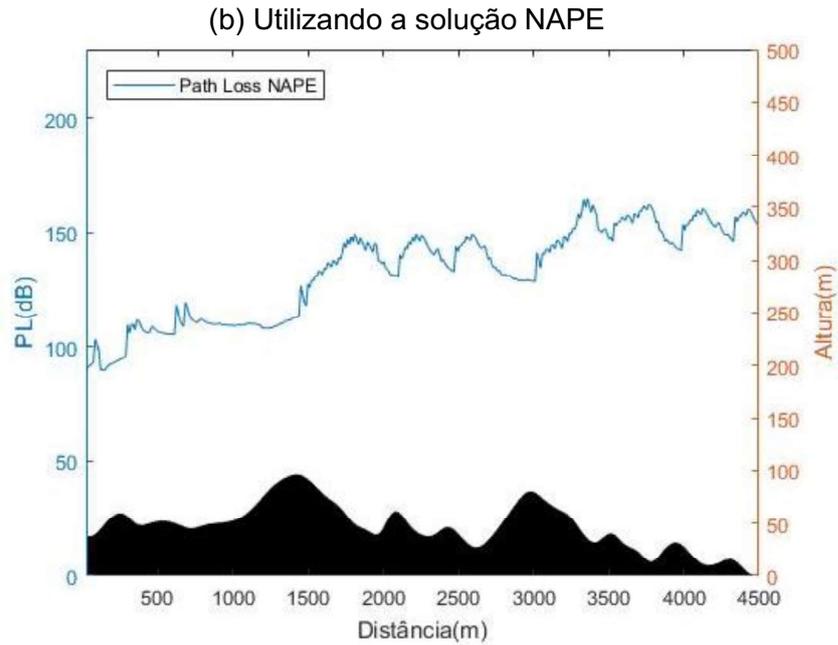
dentre outros. Além disso a solução deve incluir todos os componentes de espalhamento relevantes como múltiplas reflexões, refrações e difrações [12].

Infelizmente ainda não foi desenvolvido um *software* de predição de cobertura radioelétrica de aplicação geral que abrange todos os cenários, por este motivo compreender as limitações dos modelos computacionais é fundamental para saber os intervalos de validade dos resultados e suas precisões. Isso requer do projetista, até certo ponto, o conhecimento físico do problema que está sendo avaliado [31].

Neste trabalho são analisados enlaces em duas dimensões, levando em consideração os seguintes fatores: terreno irregular, refratividade atmosférica, perdas eletromagnéticas no solo, refrações e reflexões. As Figuras 5.12 (a) e (b) representam a atenuação ao longo do caminho de propagação para o enlace entre Eldorado e Estação Gameleira, considerando o receptor a uma altura de 2 metros do solo.

Figura 5.12 – Atenuação ao longo do enlace entre Eldorado e Estação Gameleira.
(a) Utilizando a solução WAPE





5.3.4 Rugosidade

A rugosidade de um terreno comumente se refere à variação altimétrica da superfície em relação a um plano de referência. Neste trabalho o perfil topográfico é analisado em duas dimensões, logo a referência será uma reta que melhor aproxima os pares ordenados (x, z) desse perfil. A Equação (5.1) apresenta a formulação matemática para calcular a rugosidade, e seu desenvolvimento encontra-se no Apêndice A:

$$\delta^2 = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N [z_i - m(z_i - x_0) - z_0]^2, \quad (5.1)$$

onde

δ : rugosidade;

N : número de pontos que formam o perfil;

i : índice do somatório;

m : coeficiente angular da reta;

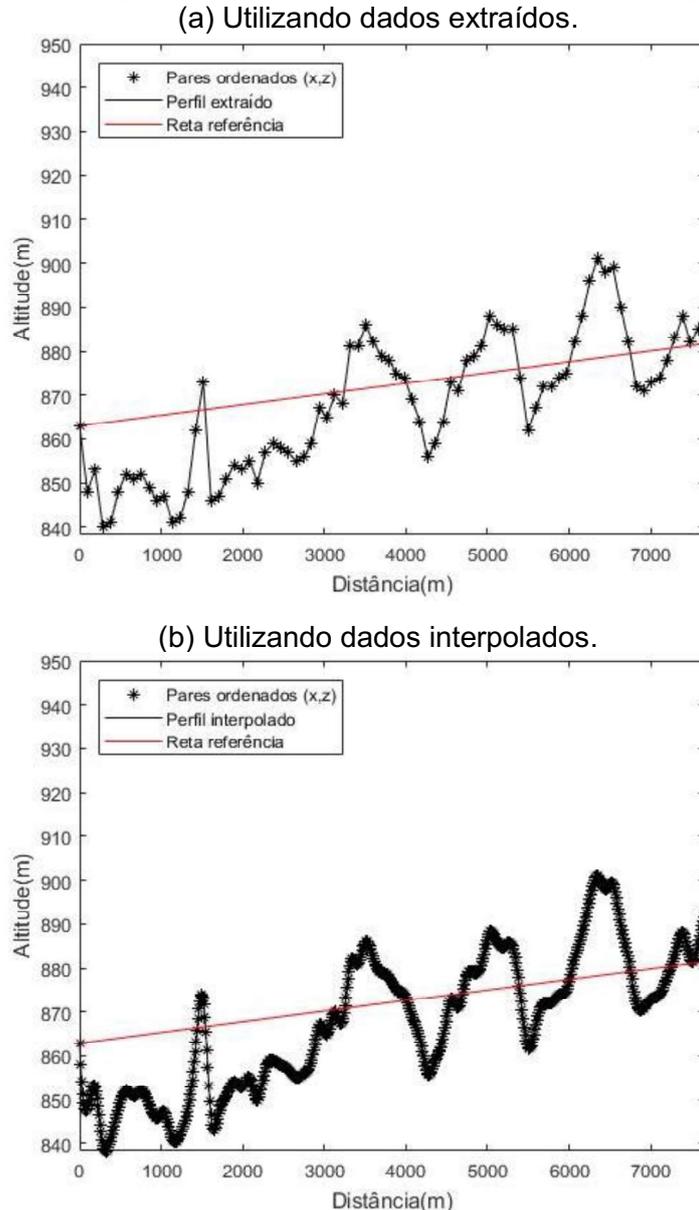
x_0, z_0 : par ordenado inicial;

x_i, z_i : demais pares ordenados.

Na implementação do algoritmo que efetua esse cálculo, foi constatado que utilizando os dados do perfil extraído ($\Delta x = 90$ m), conforme figura 5.10 (a), o tempo de processamento foi de aproximadamente 2 segundos, obtendo $\delta = 12,2505$ m, e através dos dados do perfil interpolado ($\Delta x = 12$ m), conforme figura 5.13 (b), o tempo foi de 40 segundos, gerando $\delta = 12,2498$ m.

Avaliando o desempenho, fica evidente que o primeiro caso obteve melhor performance computacional com relação aos resultados gerados, uma vez que a diferença no valor da rugosidade é mínima e seu tempo de processamento representa apenas 5% do segundo caso. Portanto, visando a eficiência do algoritmo, o cálculo será feito utilizando os dados do perfil extraído através do QGIS.

Figura 5.13 - Variação altimétrica no enlace entre CCO e Estação Vila Oeste.



CAPÍTULO 6 - RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados 88 enlaces ponto a ponto das campanhas de medições realizadas no *drive test*, conforme Anexo B. Eles foram escolhidos como sendo a origem no local do sistema de transmissão e o destino as estações no percurso de deslocamento do metrô, uma vez que nessas posições ele se encontrava parado para o embarque e desembarque de passageiros. Os parâmetros de entrada utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 6.1, onde h_{Tx} e h_{Rx} representam a altura do transmissor e receptor em relação ao nível do solo, respectivamente.

Tabela 6.1 - Parâmetros de entrada utilizados na compilação do algoritmo DMFT-SSPE.

Parâmetro	Especificação
Frequência do sinal	163,94625 MHz
Comprimento de onda	1,8292 m
Potência de transmissão	20 W
Diagrama da antena transmissora	Extraído via WebPlotDigitizer: Figura 5.8
Ganho máximo da antena transmissora	8,15 dBi
Diagrama da antena receptora	Extraído via WebPlotDigitizer: Figura 5.9
Ganho máximo da antena receptora	-0,2 dBi
Passo Δx	12 m
Passo Δz	Valor igual ao critério: Equação (3.21)
Distância inicial x_0	12 m
Ângulo de propagação WAPE	30°
Ângulo de propagação NAPE	15°
Parâmetros eletromagnéticos do solo	Tipo médio: Tabela 2.2
Variação atmosférica	Atmosfera padrão: Equação (2.1)
Altura $z_{m\acute{a}x}$	2000 m
Perfil topográfico do enlace	Extraído via QGIS: Figura 5.5
Altura h_{Rx} em todos enlaces	2 m
Altura h_{Tx} em Minas Shopping	50 m
Altura h_{Tx} em CCO	35 m
Altura h_{Tx} em Morro do Cachimbo	25 m
Altura h_{Tx} em Vilarinho	25 m
Altura h_{Tx} em Centelha 1	3 m
Altura h_{Tx} em Eldorado	15 m
Altura h_{Tx} em Calafate	20 m
Altura h_{Tx} em Waldomiro Lobo	5 m

As medições serão comparadas com os resultados computacionais com o objetivo de avaliar a precisão das predições. Antes de realizar esta comparação é preciso definir qual resposta computacional, NAPE ou WAPE, será utilizada como referência, uma vez que para os casos propostos elas apresentaram diferenças significativas, variando de 8 a 42 dB para o mesmo enlace.

Para isso, tomou-se como fundamento a seguinte definição: a solução NAPE é adequada para longas distâncias e a solução WAPE para curtas distâncias e problemas que envolvam multipercurso [18],[32]. Sendo assim, o resultado será escolhido com base na rugosidade do terreno e na distância entre transmissor e receptor.

Na seção 6.1 essas duas características serão analisadas para se definir a resposta computacional adequada para cada um dos 88 enlaces. Posteriormente na Seção 6.2 será realizada uma análise estatística para avaliar o desempenho da ferramenta computacional.

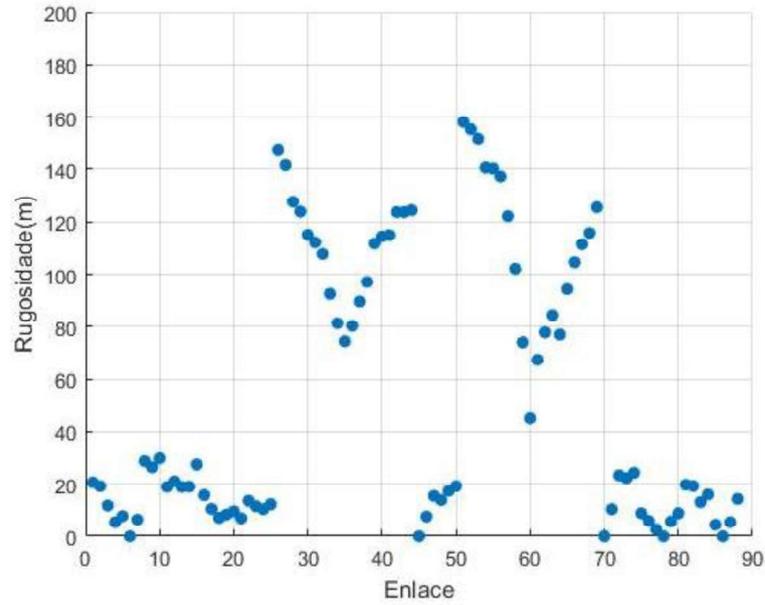
6.1 Definição da solução computacional

Inicialmente foi calculada a rugosidade (δ) para cada enlace, conforme Anexo B, e seus valores estão apresentados na Figura 6.1. Entre os resultados, os maiores foram obtidos para os perfis com a repetidora instalada no Morro do Cachimbo e em Centelha 1, regiões de maior altitude em relação a via férrea. Nas demais localidades, as repetidoras foram instaladas próximas as estações de metrô, portanto a variação altimétrica desses enlaces foram menores. Na Tabela 6.2 os dados foram agrupados para cada sistema de transmissão e apresentados os valores máximos e mínimos de rugosidade.

Tabela 6.2 - Rugosidade dos perfis de enlace.

Local da repetidora	Enlace inicial	Enlace final	$\delta_{mínima}(m)$	$\delta_{máxima}(m)$
Minas Shopping	1	15	0	29,79
CCO	16	25	6,94	15,72
Morro do Cachimbo	26	44	74,42	147,59
Vilarinho	45	50	0	19,16
Centelha 1	51	69	45,05	158,11
Eldorado	70	74	0	24,28
Calafate	75	80	0	8,85
Waldomiro Lobo	81	88	0	19,71

Figura 6.1 - Valores da rugosidade dos enlaces.



Um parâmetro normalmente utilizado em pesquisas de radiopropagação é a rugosidade normalizada em relação ao comprimento de onda do sinal. Nos testes a frequência utilizada corresponde a um comprimento de onda $\lambda = 1,8292$ m, sendo assim teremos valores entre 0 e 86 vezes, aproximadamente, o comprimento de onda. Esses valores podem ser visualizados em sua totalidade na Figura 6.2 e em agrupamentos na Tabela 6.3.

Figura 6.2 - Valores da rugosidade normalizada dos enlaces.

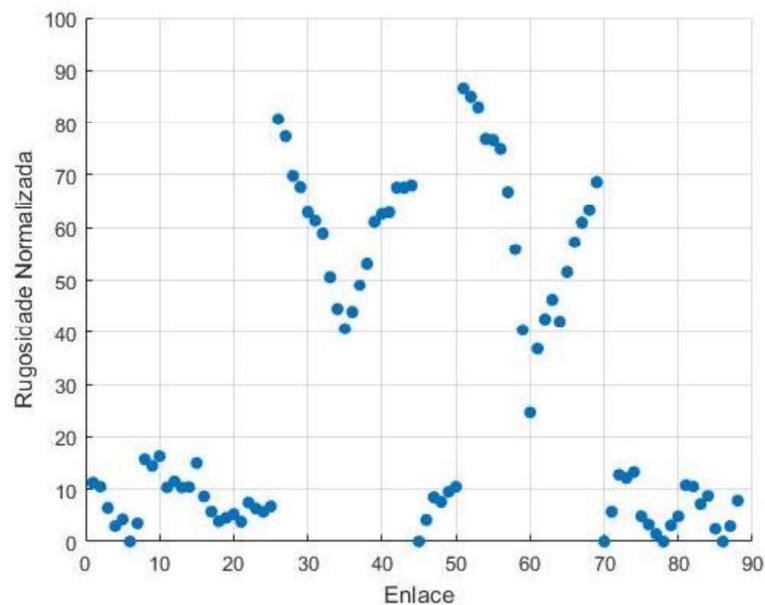


Tabela 6.3 - Rugosidade normalizada dos perfis de enlace.

Local da repetidora	Enlace inicial	Enlace final	$\delta_{mínima}/\lambda$	$\delta_{máxima}/\lambda$
Minas Shopping	1	15	0	16,28
CCO	16	25	3,79	8,59
Morro do Cachimbo	26	44	40,68	80,68
Vilarinho	45	50	0	10,47
Centelha 1	51	69	24,62	86,43
Eldorado	70	74	0	13,27
Calafate	75	80	0	4,83
Waldomiro Lobo	81	88	0	10,77

Como o algoritmo produz duas respostas computacionais para o mesmo enlace e as medições em campo apresenta apenas um valor, pretende-se agora calcular o Erro Absoluto (EA), através da Equação 6.1, para avaliar qual solução computacional, NAPE ou WAPE, melhor se aproximou do valor real medido.

$$EA = |Vc - Vr|, \quad (6.1)$$

onde

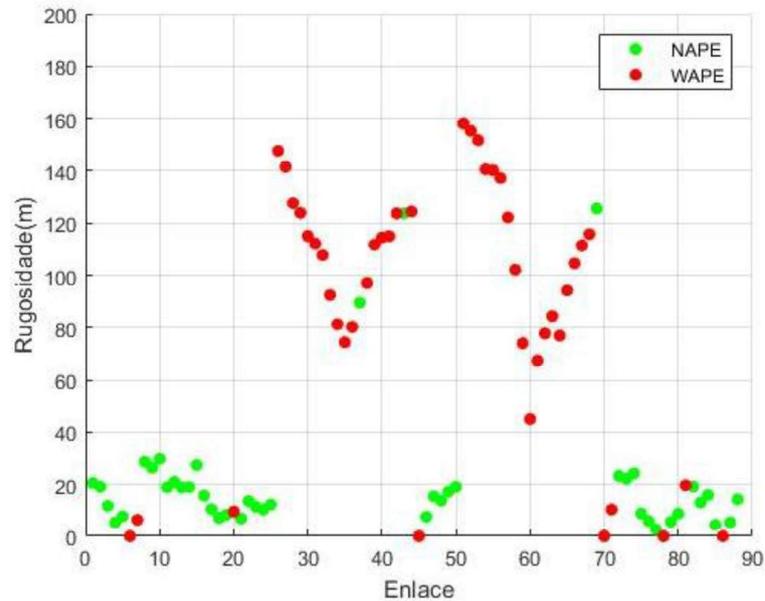
Vc = valor computacional;

Vr = valor real.

Com base nesses resultados foi possível estabelecer uma relação entre a rugosidade do enlace e a melhor técnica de predição para cada caso. Na Figura 6.3 são apresentadas duas correlações: na primeira os pontos na cor verde indicam que naqueles enlaces a solução NAPE obteve menor erro absoluto, e na segunda os pontos na cor vermelha indicam que a solução WAPE obteve melhor aproximação.

Observa-se que os pontos vermelhos se concentraram nos enlaces com maiores valores de rugosidade (mínima de 45,05 metros para o enlace entre Centelha 1 e Estação Santa Tereza), e os pontos verdes nos enlaces com menores valores (máxima de 29,79 metros para o enlace entre Minas Shopping e Estação Santa Tereza). Com base nesses números serão definidos dois conjuntos de enlaces: o primeiro para os perfis com rugosidade maior que 45 metros e o segundo para os perfis com rugosidade inferior a 30 metros.

Figura 6.3 - Correlação entre a técnica com menor erro absoluto e o valor da rugosidade.



O segundo parâmetro analisado será a distância (D) entre o transmissor e o receptor, de acordo com a Equação (6.2):

$$D = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (z_T - z_R)^2}, \quad (6.2)$$

onde

(x_R, z_R) : representa as coordenadas do receptor no plano cartesiano;

(x_T, z_T) : representa as coordenadas do transmissor no plano cartesiano.

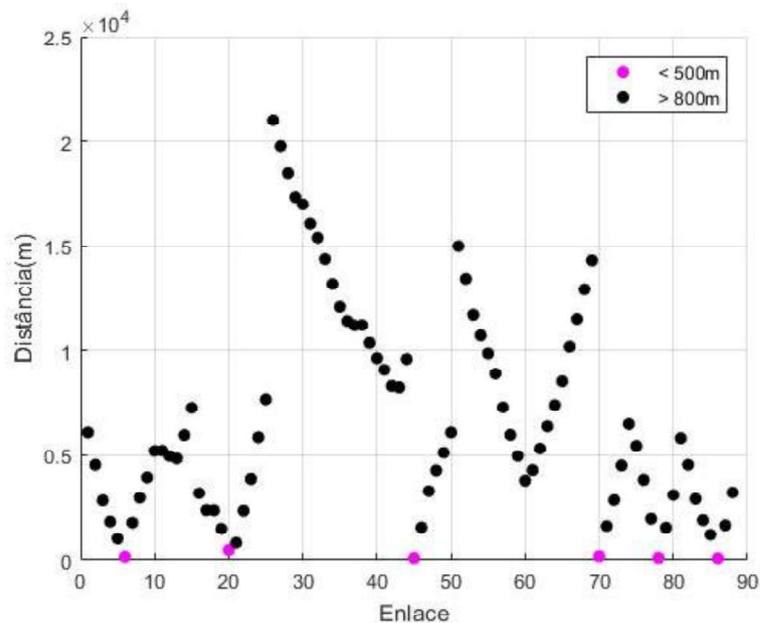
O cálculo foi realizado para todos os enlaces e os resultados foram agrupados para cada sistema de transmissão, sendo seus valores máximos e mínimos apresentados na Tabela 6.4.

Na Figura 6.4 são apresentadas duas correlações: na primeira os pontos na cor rosa indicam que naqueles enlaces a distância entre transmissor e receptor é menor que 500 metros, e na segunda os pontos na cor preta indicam que naqueles enlaces a distância é maior que 800 metros.

Tabela 6.4 - Distâncias agrupadas entre transmissor e receptor.

Local da repetidora	Enlace inicial	Enlace final	$D_{mínima}$ (m)	$D_{máxima}$ (m)
Minas Shopping	1	15	155	7267
CCO	16	25	471	7675
Morro do Cachimbo	26	44	8239	21003
Vilarinho	45	50	94	6093
Centelha 1	51	69	3792	14984
Eldorado	70	74	180	6490
Calafate	75	80	106	5457
Waldomiro Lobo	81	88	84	5821

Figura 6.4 - Distância entre transmissor e receptor dos enlaces.



É importante lembrar que neste estudo inicial estão sendo avaliados apenas 88 pontos de medição em um conjunto total de 1465, de acordo com critérios estabelecidos no início desse capítulo. Sendo assim, o estudo não possui enlaces com distâncias entre 471 metros (CCO e Estação Central) e 819 metros (CCO e Estação Lagoinha) para serem avaliados. Por esse motivo foram escolhidos os limites de 500 e 800 metros para determinar a classificação no enlace.

Agora que já relacionamos os enlaces com as principais características que estamos avaliando, rugosidade e distância, podemos definir a solução computacional adequada para cada um. Conforme mencionado anteriormente, sabe-se que a solução WAPE é indicada para terrenos com maior irregularidade e distâncias

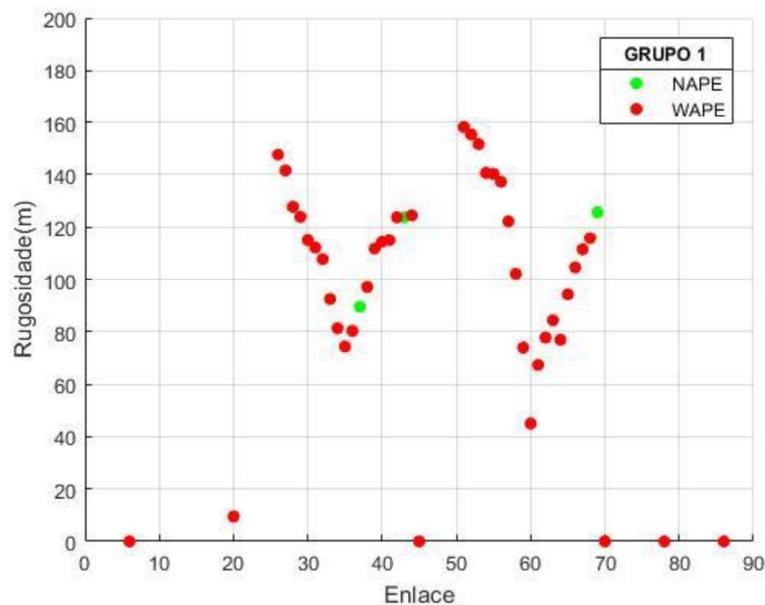
menores e a solução NAPE para enlaces de maior alcance, portanto foram criados dois grupos que abrangem essas características:

- Grupo 1: contém os enlaces com rugosidade superior a 45m e distância entre transmissor e receptor menor que 500m;
- Grupo 2: contém os enlaces com rugosidade inferior a 30m e distância entre transmissor e receptor maior que 800m.

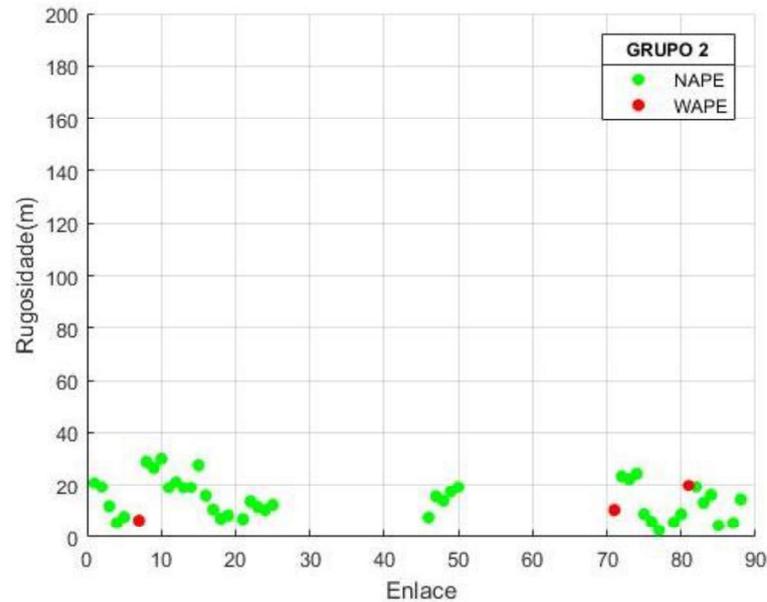
Analisando as Figuras 6.5 (a) e (b), observa-se que nos dois grupos a solução mais adequada obteve convergência de 93,18% dos enlaces, enquanto a solução menos adequada apresentou melhor resultado em apenas 6,82%. Isso demonstra uma validação positiva dos agrupamentos propostos.

Portanto, na próxima seção será feita uma comparação entre os valores medidos na campanha de medição e os resultados computacionais WAPE para o Grupo 1 e NAPE para o Grupo 2, com o objetivo de avaliar a precisão das predições.

Figura 6.5 - Agrupamento dos enlaces.
(a) Grupo 1.



(b) Grupo 2.



6.2 Análise estatística do Grupo 1

Neste momento estão definidos dois grupos de enlaces que atendem a critérios específicos que os classificam quanto à solução adequada para o processo de predição de cobertura. Coincidentemente, cada um possui a mesma quantidade: 44 enlaces, e dentro desses subconjuntos será feita uma análise direcionada ao erro absoluto, avaliando o quão próximo estão os valores computacionais dos reais medidos em campo.

Para distribuições de frequência, a forma mais comum de apresentação gráfica é o histograma, que é formado por barras verticais de um conjunto de dados previamente tabulados, o qual será utilizado para avaliar o Grupo 1. Foram definidas cinco classes que representam o erro absoluto, com intervalos de 6 dB cada, conforme apresentado na Tabela 6.5. A Figura 6.6 apresenta a frequência relativa, que é a razão entre a frequência absoluta e a quantidade de elementos da amostra, das classes de erro.

Na Figura 6.7 é apresentado o histograma, sendo que a base de cada retângulo representa uma classe e a altura representa a quantidade de vezes que seu valor ocorre no conjunto de dados. Para cada intervalo, a área de cada barra é igual a frequência relativa das medições, ou seja, é uma estimativa da probabilidade de a medição cair no intervalo [33].

Tabela 6.5 - Frequências e porcentagens do Grupo 1 por faixa de erro absoluto.

Classe de erro absoluto (dB)	Frequência absoluta (enlace)	Frequência relativa (%)
0 — 6	26	59
6 — 12	9	21
12 — 18	3	7
18 — 24	5	11
24 — 30	1	2
Total	44	100

Figura 6.6 - Frequência relativa dos enlaces nas classes de erro absoluto para o Grupo 1.

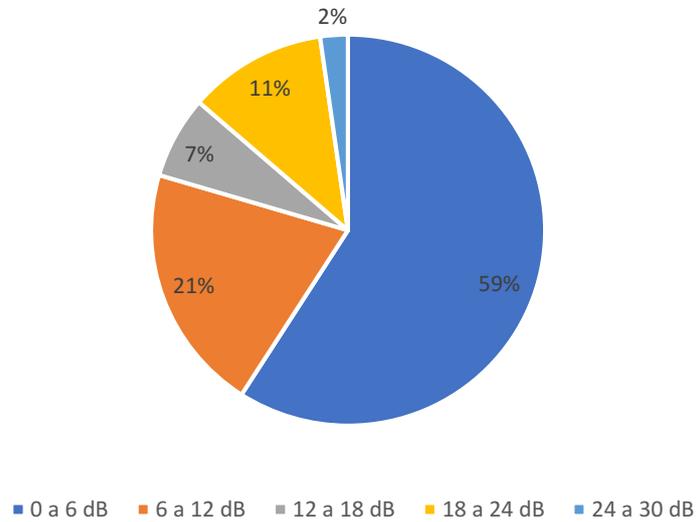
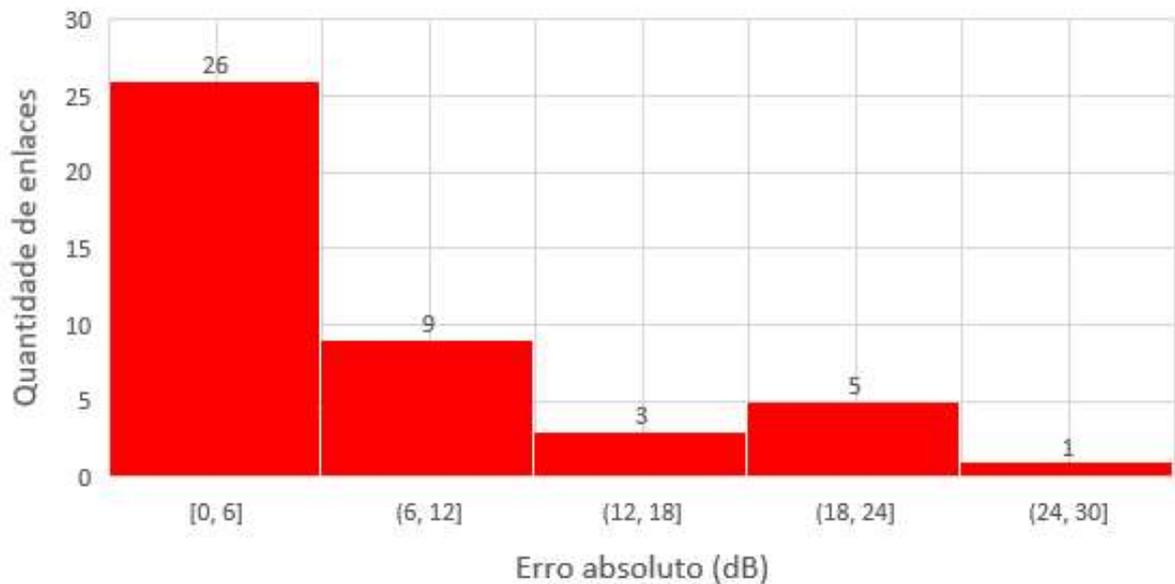


Figura 6.7 - Histograma do erro absoluto para o Grupo 1.



No caso em análise, é possível observar que os resultados computacionais têm maior probabilidade de se afastarem das medições na amplitude das duas primeiras classes. Considerando-se a grande sensibilidade dos receptores de radiofrequência atualmente, uma margem de erro de 12 dB pode ser aceitável em projetos iniciais utilizando previsão de cobertura por *software*. Sendo assim, 80% dessas simulações atenderiam satisfatoriamente a finalidade do teste.

Outros dois parâmetros bastante utilizados em estatística para tirar conclusões acerca de um conjunto de dados são o Erro Absoluto Médio (EAM) e o Desvio Padrão (DP). O primeiro mede o afastamento médio das previsões em relação aos valores observados, ou seja, a média dos erros cometidos pelo modelo, Equação 6.2. O segundo é uma medida que indica o grau de dispersão dos dados dentro de uma amostra em relação a média, ou seja, o quão uniforme é esse conjunto, Equação 6.3.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^N |Vc_i - Vr_i|}{N}, \quad (6.2)$$

onde

Vc_i = valor computacional;

Vr_i = valor real;

N = número de elementos no conjunto;

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (EA - EAM)^2}{N}}, \quad (6.3)$$

sendo

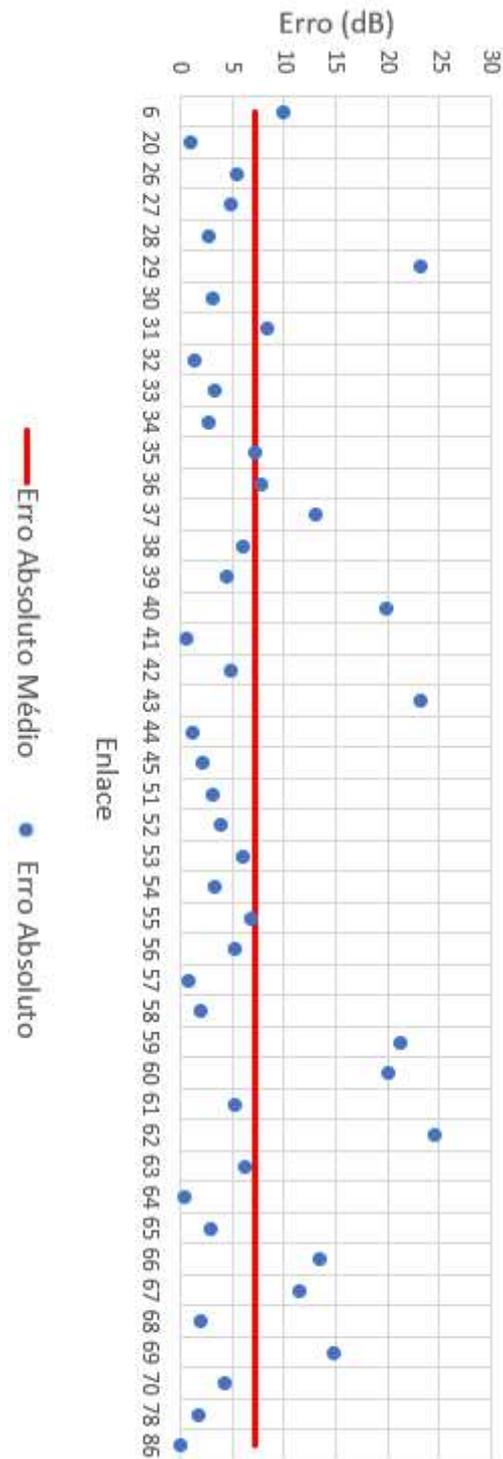
EA = erro absoluto;

EAM = erro absoluto médio;

N = número de elementos no conjunto.

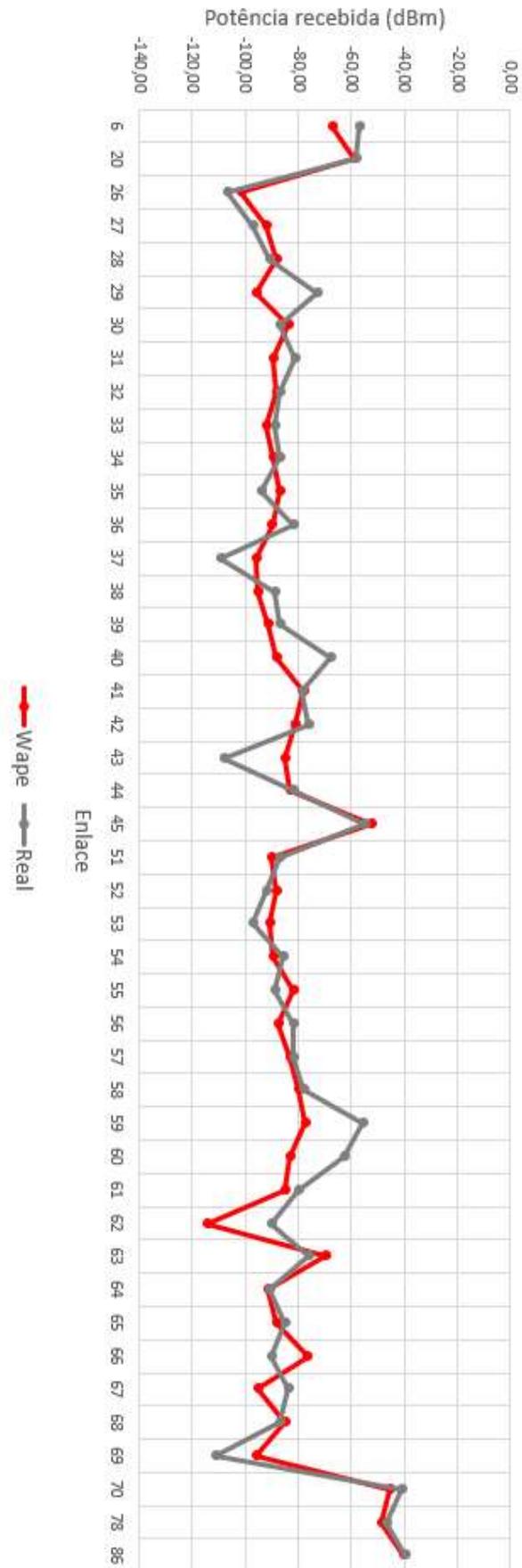
Para o conjunto de dados do Grupo 1, o erro absoluto médio foi de 7,22 dB e o desvio padrão de 6,93 dB. A Figura 6.8 apresenta um gráfico que relaciona a dispersão do erro absoluto em relação à sua média. Na parte inferior, os números indicam o número do enlace de acordo com a tabela que consta no Anexo B.

Figura 6.8 - Dispersão do Erro Absoluto para o Grupo 1.



Na Figura 6.9 é apresentado um gráfico com os valores de potência recebida gerados pela solução WAPE e os medidos para os enlaces que formam o primeiro grupo. Como esperado, após as análises anteriores, observa-se uma concordância razoavelmente boa entre a previsão e a medição.

Figura 6.9 - Comparação entre valores computacionais e medidos do Grupo 1.



6.3 Análise estatística do Grupo 2

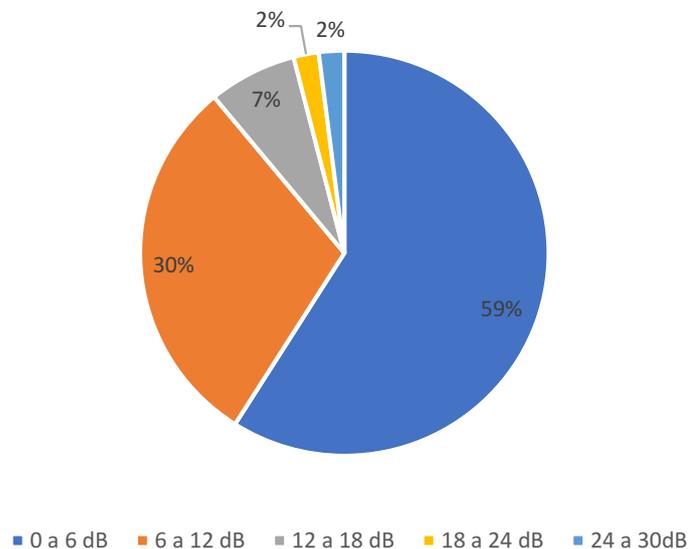
Agora serão avaliados os enlaces que formam o segundo grupo, utilizando os mesmos conceitos do anterior, ou seja, uma análise direcionada ao erro absoluto através de gráficos e parâmetros calculados. Foram definidas as mesmas cinco classes que representam o erro absoluto, com intervalos de 6 dB cada, conforme apresentado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Frequências e porcentagens do Grupo 2 por faixa de erro absoluto.

Classe de erro absoluto (dB)	Frequência absoluta (enlace)	Frequência relativa (%)
0 — 6	26	59
6 — 12	13	30
12 — 18	3	7
18 — 24	1	2
24 — 30	1	2
Total	44	100

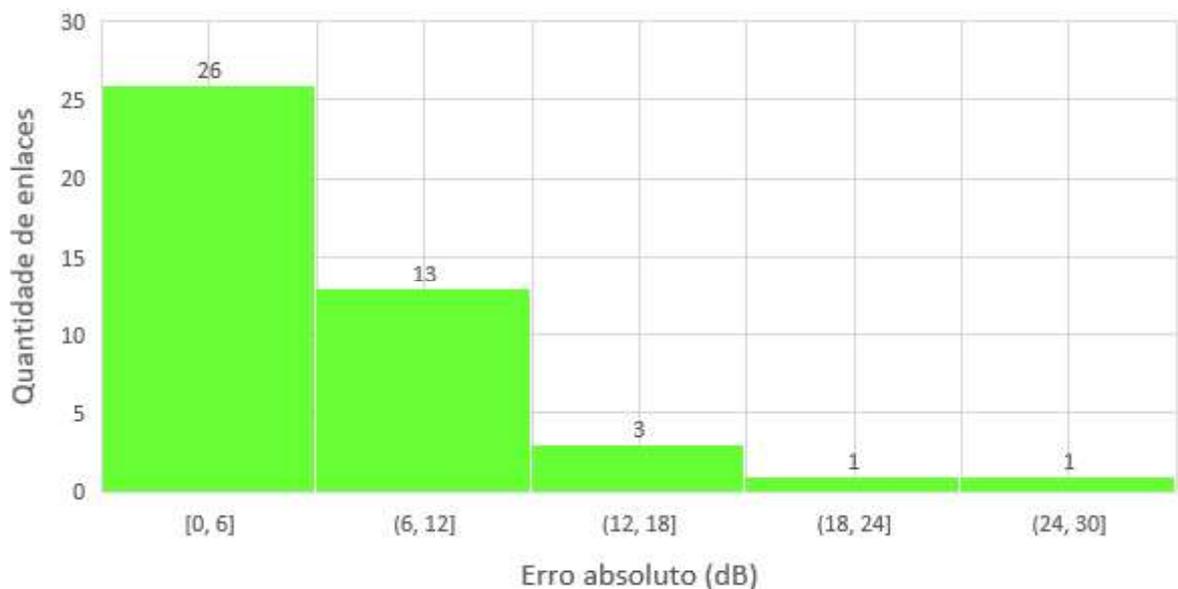
A Figura 6.10 apresenta a frequência relativa do conjunto de amostras distribuídas nessas cinco faixas. Podemos observar uma melhor convergência de resultados quando se utiliza a solução NAPE, com 89% das previsões tendo um erro absoluto menor que 12 dB.

Figura 6.10 - Percentual dos enlaces nas classes de erro absoluto para o Grupo 2.



Analisando o histograma da Figura 6.11, é possível observar que os resultados computacionais têm maior probabilidade de apresentarem erro absoluto com amplitude das duas primeiras classes. Utilizando a mesma premissa anterior, que os receptores atualmente possuem grande sensibilidade, uma margem de erro de 12 dB pode ser aceitável em projetos iniciais de previsão de cobertura, dado o custo benefício de se utilizar uma ferramenta computacional. Sendo assim, quase 90% dessas simulações atenderiam satisfatoriamente a finalidade do teste.

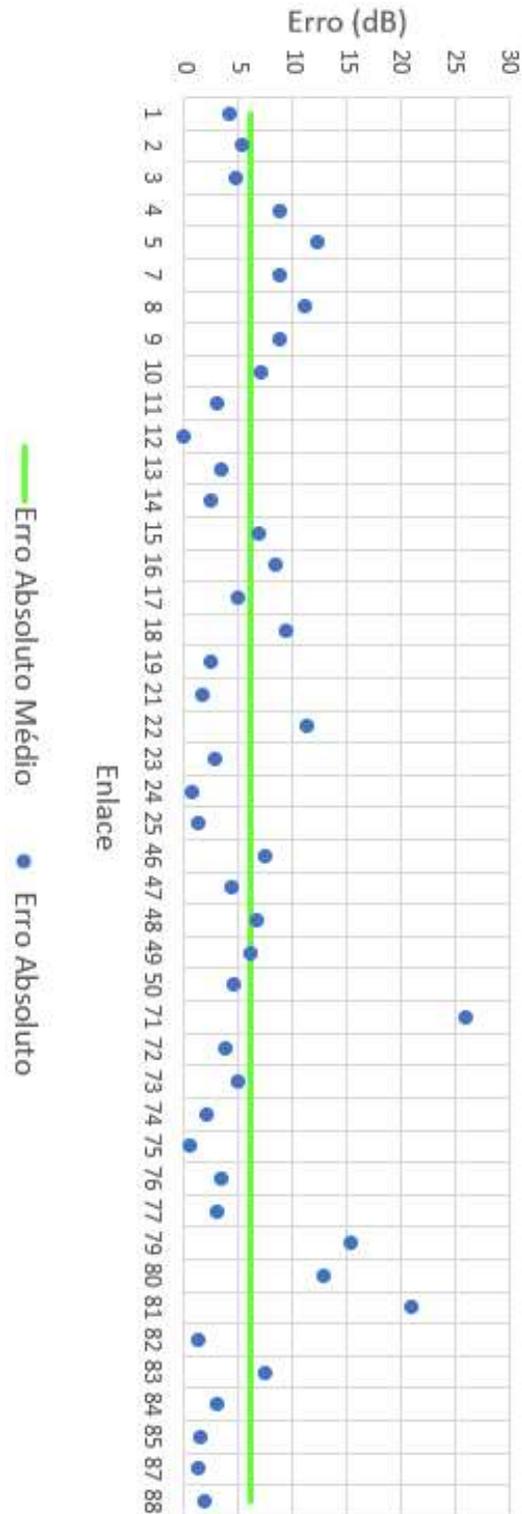
Figura 6.11 - Histograma do erro absoluto para o Grupo 2.



Novamente, para auxiliar a análise do conjunto de valores que compõem o Grupo 2, serão calculados o erro absoluto médio, Equação 6.2, e o desvio padrão, Equação 6.3, com o objetivo de mensurar o afastamento médio das previsões e seu grau de dispersão.

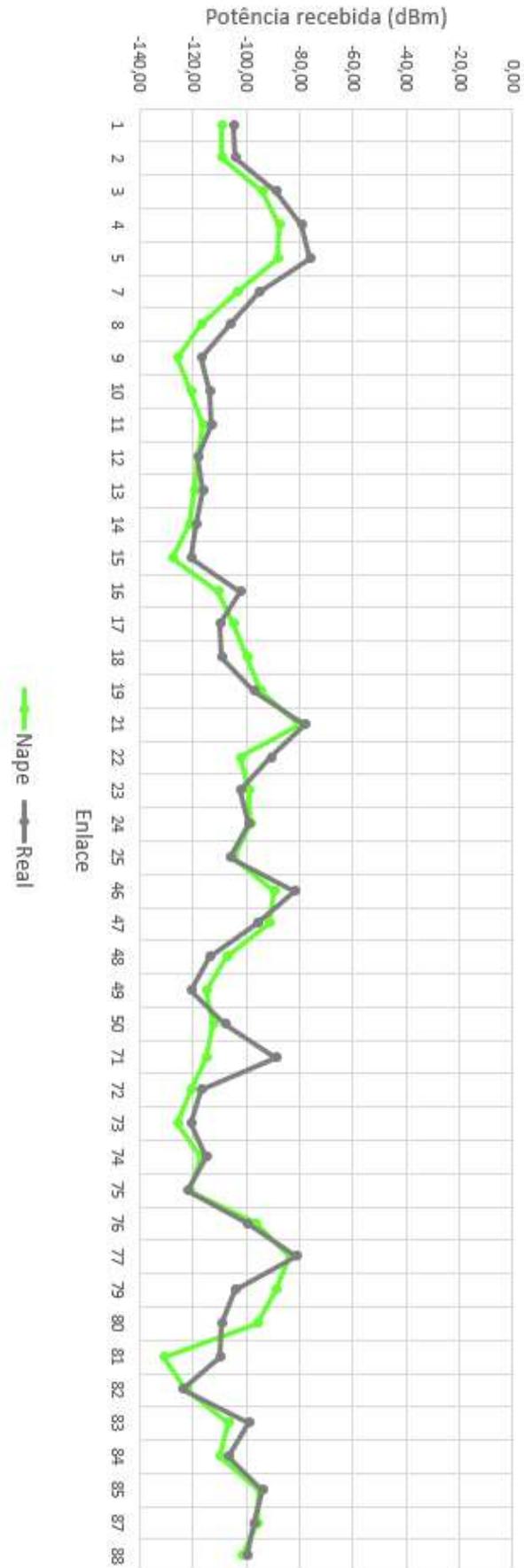
Para esse conjunto de dados, o erro absoluto médio foi de 6,12 dB e o desvio padrão de 5,33 dB. A Figura 6.12 apresenta um gráfico que relaciona a dispersão do erro absoluto em relação à sua média, sendo possível observar grande concentração dos pontos azuis em torno da reta verde. Na parte inferior, os números indicam o número do enlace de acordo com a tabela que consta no Anexo B.

Figura 6.12 - Dispersão do Erro Absoluto para o Grupo 2.



Na Figura 6.13 é apresentado um gráfico com os valores de potência recebida gerados pela solução NAPE e os medidos para os enlaces que formam o segundo grupo. Como esperado, após as análises anteriores, observa-se uma concordância razoavelmente boa entre a previsão computacional e o valor real medido em campo.

Figura 6.13 - Comparação entre valores computacionais e medidos do Grupo 2.



CAPÍTULO 7 - IMPLEMENTAÇÕES FINAIS

7.1 Retroespalhamento

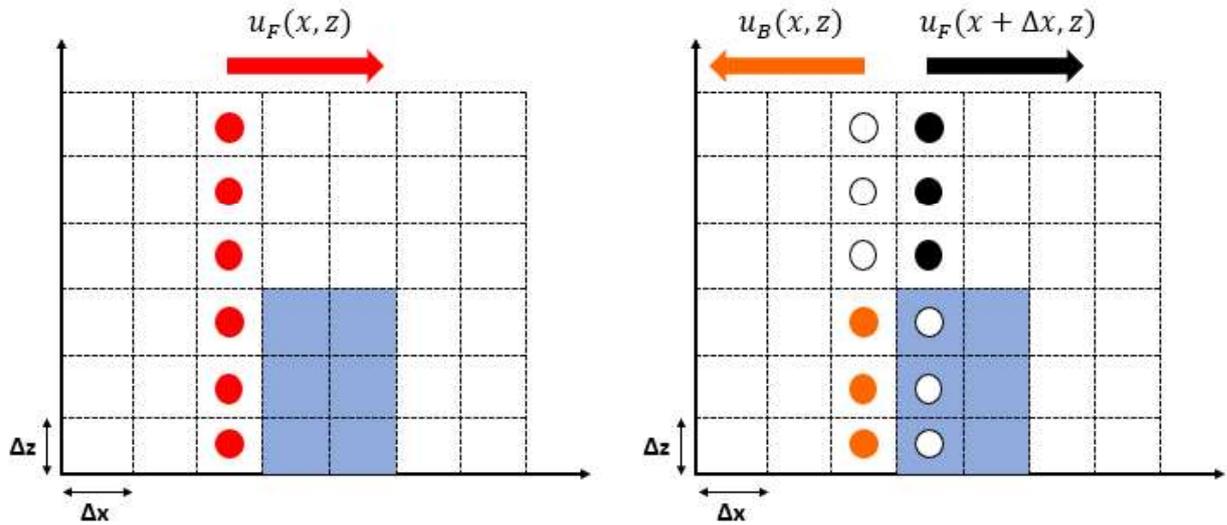
O método SSPE, apresentado e implementado nos capítulos anteriores, é um algoritmo de marcha unidirecional que modela eficientemente a propagação eletromagnética na troposfera, também conhecido como 1W-SSPE (*One-Way Split-Step Parabolic Equation*). Seu principal inconveniente é negligenciar o retroespalhamento e considerar apenas os efeitos das ondas refletidas, refratadas e difratadas na direção paraxial.

No entanto, considerar essas componentes também na direção contrária à de propagação principal torna-se relevante, especialmente na presença de superfícies irregulares [34]. Para contornar essa deficiência foi desenvolvida uma técnica que considera esses efeitos em ambas direções, que ficou conhecida como 2W-SSPE (*Two-Way Split-Step Parabolic Equation*), nos estudos publicados em [12],[20],[34].

O algoritmo implementado consiste em dividir o perfil vertical do campo incidente em um obstáculo em duas componentes: a primeira seguirá na direção paraxial até que chegue na posição $x = x_{máx}$ do domínio de interesse, e a segunda seguirá na direção contrária à propagação principal até que chegue na posição inicial $x = x_0$, conforme Figura 3.3.

A Figura 7.1 apresenta o cenário descrito no parágrafo anterior. O gráfico da esquerda ilustra um perfil vertical de campo, $u_F(x, z)$, representado pelos círculos de cor vermelha, a um passo de incidir sobre um obstáculo retangular de cor azul. Já o gráfico da direita ilustra o passo seguinte, onde ocorre a colisão, gerando dessa forma a componente de campo no sentido direto, $u_F(x + \Delta x, z)$, representada pelos círculos de cor preta, e a componente de campo no sentido reverso, $u_B(x, z)$, representada pelos círculos de cor laranja. Em ambas situações, os círculos de cor branca ilustram que naquelas posições o campo é nulo.

Figura 7.1 - Modelo de propagação 2W-SSPE



Vale ressaltar que o equacionamento numérico da componente do campo incidente $u_F(x, z)$ é o mesmo da componente do campo no sentido direto $u_F(x + \Delta x, z)$, ou seja, ambas são governadas pelas Equações (3.8) e (3.9), caracterizando dessa forma o modelo 1W-SSPE. Por outro lado, o campo $u_B(x, z)$ que será propagado no sentido reverso apresentará mudanças importantes na formulação numérica. Esses detalhes serão apresentados na Subseção 7.1.1.

Dado o exposto, podemos observar que durante a propagação do campo principal $u_F(x, z)$ ao longo de um enlace com superfície irregular, o processo descrito pela técnica 2W-SSPE irá se repetir por diversas vezes, portando, o campo final total $u_T(x, z)$ em cada posição do ambiente será o somatório das contribuições individuais de cada ponto de retroespalhamento juntamente com o campo na direção paraxial, conforme Equação (7.1):

$$u_T(x, z) = u_F(x, z) + \sum_{i=1}^N u_{B_i}(x, z) \quad (7.1)$$

onde

$u_{B_i}(x, z)$: representa a contribuição do i -ésimo campo retroespalhado, começando em sua origem e deslocando até a posição x_0 do domínio do método SSPE, Figura 3.3.

7.1.1 Formulação numérica

Em relação à formulação numérica do algoritmo, o campo no sentido direto (*Forward*) é governado pelas mesmas equações apresentadas na Seção 3.2, portanto, para a solução NAPE teremos a Equação (7.2) e para Solução WAPE a Equação (7.3):

$$u_F(x + \Delta x, z) = e^{[ik(n^2(z)-1)\frac{\Delta x}{2}]_{F^{-1}}} \left\{ e^{(-ip^2\frac{\Delta x}{2k})} F\{u_F(x, z)\} \right\}, \quad (7.2)$$

$$u_F(x + \Delta x, z) = e^{[ik(n(z)-1)\Delta x]_{F^{-1}}} \left\{ e^{(-ip^2\frac{\Delta x}{k})} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{p}{k}\right)^2} + 1 \right)^{-1} F\{u_F(x, z)\} \right\}, \quad (7.3)$$

No entanto, o campo no sentido reverso (*Backward*) passará por algumas mudanças significativas. Primeiramente, antes de iniciar o processo de marcha da técnica, é necessário calcular o campo inicial do retroespalhamento. Seu valor será a multiplicação do campo que incide no obstáculo pelo coeficiente de reflexão da superfície, conforme Equação 7.4:

$$u_B(x, z) = \begin{cases} u_F(x, z) \times \Gamma_V, & \text{para polarização vertical.} \\ u_F(x, z) \times \Gamma_H, & \text{para polarização horizontal.} \end{cases} \quad (7.4)$$

onde

$$\Gamma_V = \frac{1 - \sqrt{\gamma}}{1 + \sqrt{\gamma}}, \quad (7.5)$$

$$\Gamma_H = \frac{\sqrt{\gamma} - 1}{\sqrt{\gamma} + 1}, \quad (7.6)$$

sendo γ a permissividade relativa complexa do solo, expressa através da Equação (3.19).

Posteriormente, deve-se definir o sentido de propagação do campo reverso como sendo o inverso do campo direto, conforme apresentado pelas Equações (7.7) e (7.8) [12]:

$$\psi_F(x, z) = u_F(x, z)e^{ikx}, \quad (7.7)$$

$$\psi_B(x, z) = u_B(x, z)e^{-ikx}. \quad (7.8)$$

Finalmente, para que o deslocamento do perfil vertical do campo se desloque na direção negativa do eixo x , deve-se alterar o incremento de valor Δx das Equações (7.2) e (7.3) para um decremento de valor $-\Delta x$, conforme apresentado pela Equação (7.9), referente à solução NAPE, e pela Equação (7.10), referente à solução WAPE:

$$u_B(x - \Delta x, z) = e^{[ik(n^2(z)-1)\frac{\Delta x}{2}]_{F-1}} \left\{ e^{(-ip^2\frac{\Delta x}{2k})} F\{u_B(x, z)\} \right\}, \quad (7.9)$$

$$u_B(x - \Delta x, z) = e^{[ik(n(z)-1)\Delta x]_{F-1}} \left\{ e^{(-ip^2\frac{\Delta x}{k})\left(\sqrt{1-\left(\frac{p}{k}\right)^2}+1\right)^{-1}} F\{u_B(x, z)\} \right\}, \quad (7.10)$$

7.1.2 Parâmetros de saída

Além de tornar os resultados computacionais mais próximos da realidade, devido considerar o retroespalhamento, a nova técnica implementada no algoritmo traz a vantagem do usuário poder escolher o local de recepção ao longo do ambiente de propagação analisado, sendo que antes o enlace era ponto a ponto fixo entre o início e o final do domínio de interesse. Sendo assim, a expressão numérica para calcular o nível de potência recebida (dB) será alterada, conforme Equação (7.11):

$$\Pr(x_R, z) = 20 \log \left(\left| \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x_R}} u_F(x_R, z) e^{ikx_R} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x_{B_i} - x_R}} u_{B_i}(x_R, z) e^{-ik(x_{B_i} - x_R)} \right) \right| \right). \quad (7.11)$$

onde

x_R : coordenada x do local de recepção escolhido;

x_{B_i} : coordenada x do i -ésimo perfil de campo inicial de retroespalhamento.

É possível observar na Equação (7.11) que a potência recebida no local de interesse x_R é a soma das contribuições relativas ao campo no sentido direto $u_F(x_R, z)$ e dos campos no sentido reverso $u_{B_i}(x_R, z)$.

Outro parâmetro de saída que sofreu alteração em sua formulação numérica é o *Path Loss* (dB), que agora considera as duas componentes de campo em cada posição do domínio computacional, conforme Equação (7.12):

$$PL(x, z) = -20 \log|u_T(x, z)| + 20 \log(4\pi) + 10 \log(x) - 30 \log(\lambda), \quad (7.12)$$

onde

$u_T(x, z)$: representa o campo total, calculado através da Equação (7.1).

7.1.3 Simulação

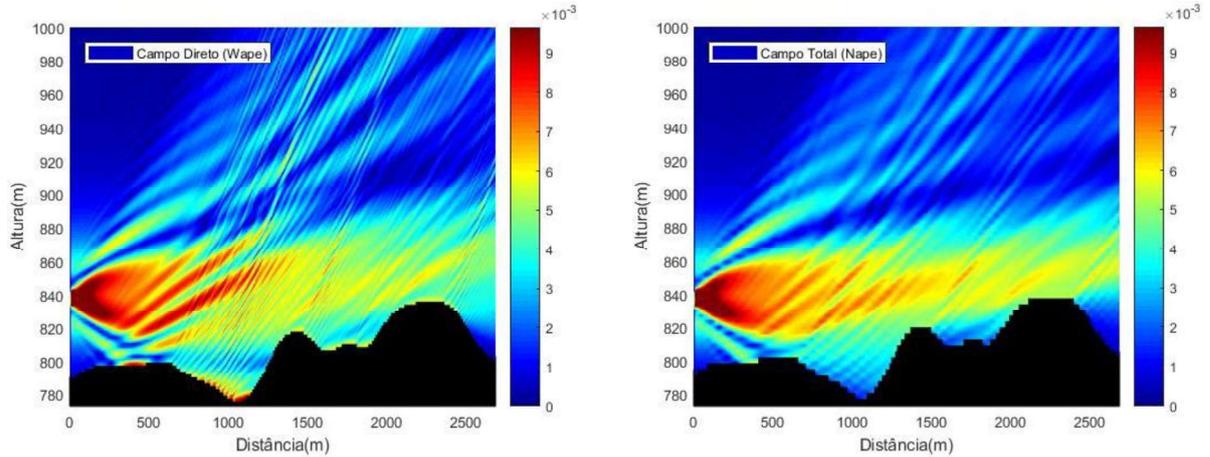
Todos os conceitos relativos à técnica 2W-SSPE tratados nesse capítulo foram implementados no algoritmo desenvolvido no Capítulo 5 e as novas formulações adicionadas. Para visualizar os efeitos do retroespalhamento foi escolhido o enlace entre Minas Shopping e Estação São Gabriel, devido ele possuir após o local de recepção um relevo que representa um grande obstáculo a propagação do campo no sentido direto, produzindo dessa forma diversas fontes de campo reverso que contribuíram para modificar os resultados simulados para o enlace 5 da Tabela B.1 no Anexo B.

A simulação foi realizada com os mesmos parâmetros de entrada estabelecidos na Tabela 2.1, para que se possa realizar uma comparação entre os resultados computacionais produzidos sem e com o retroespalhamento. A Figura 7.2 apresenta os mapas de campo no sentido direto, reverso e também o campo total, representado

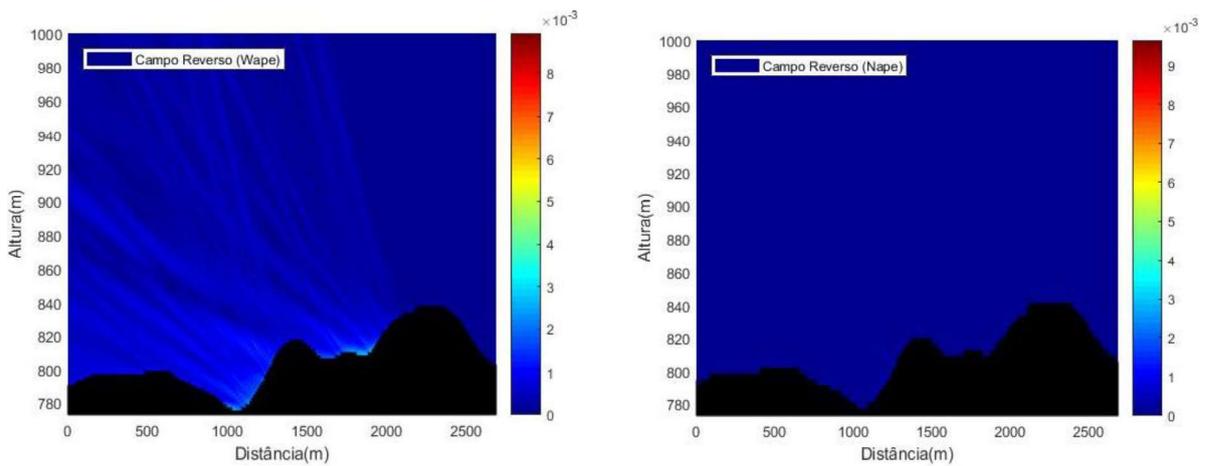
pela soma das duas contribuições anteriores. Os gráficos da esquerda ilustram os resultados utilizando a solução WAPE e os da direita referentes à solução NAPE.

Figura 7.2 - Mapa do campo WAPE e NAPE considerando o retroespalhamento.

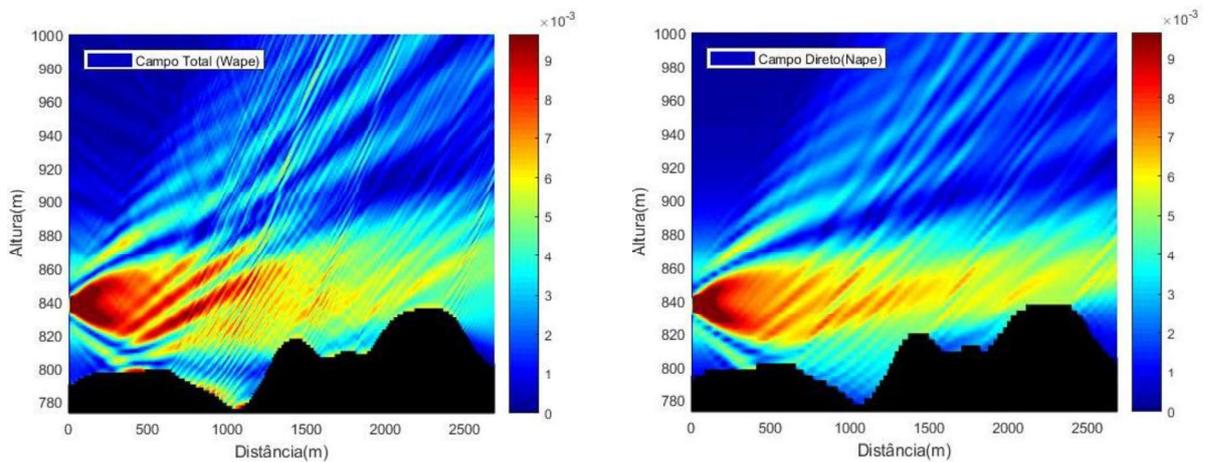
(a) Distribuição do campo no sentido direto $u_F(x, z)$.



(b) Distribuição do campo no sentido reverso $u_B(x, z)$.



(c) Distribuição do campo total $u_T(x, z)$.

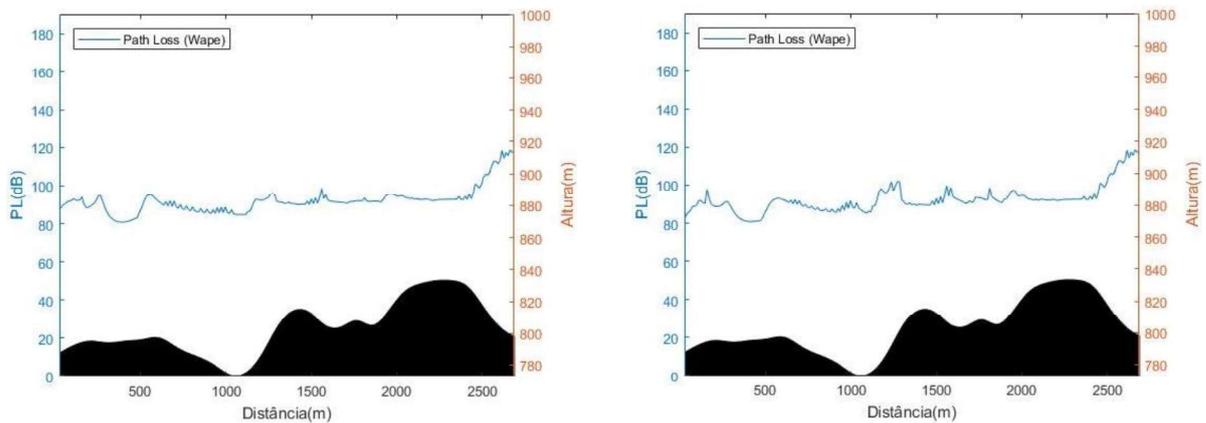


Em coerência com a fundamentação estabelecida no Capítulo 6, que a solução WAPE é mais adequada para enlaces de curta distância e que envolvam multipercurso, através de uma análise da Figura 7.2 (b) percebe-se que a solução NAPE praticamente não apresentou campos relevantes de retroespalhamento, ao passo que na solução WAPE observa-se um nível de campo considerável que influenciará nos valores da atenuação do enlace e da potência recebida.

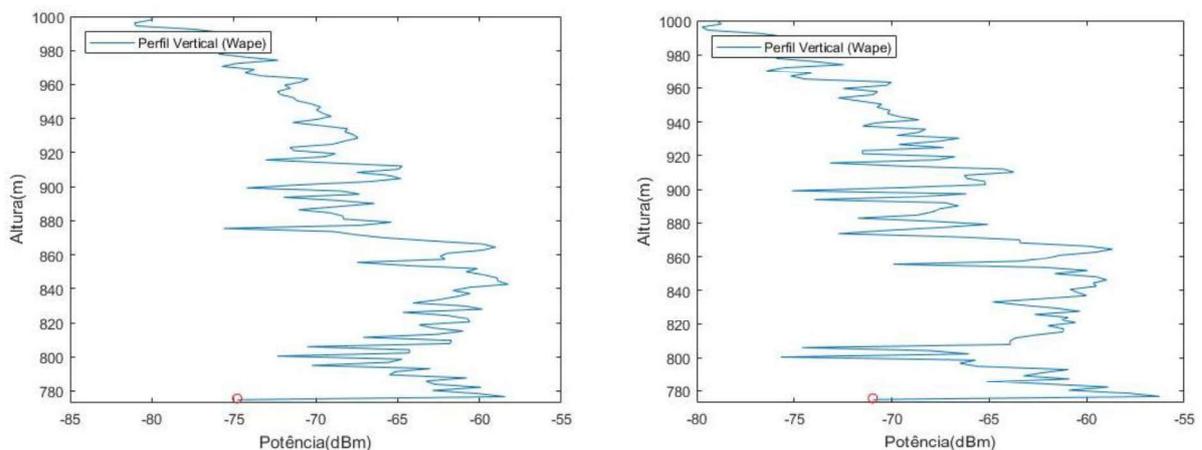
Por esse motivo, a comparação gráfica apresentada na Figura 7.3 é relativa à solução computacional WAPE, onde os gráficos da esquerda representam o modelo 1W-SSPE, que desconsidera o retroespalhamento, e os gráficos da direita representam o modelo 2W-SSPE, que considera o retroespalhamento.

Figura 7.3 - Comparação de resultados sem e com retroespalhamento da solução WAPE.

(a) Atenuação ao longo do enlace.



(b) Potência recebida.



Observa-se que a atenuação apresentou alteração mais acentuada entre as distâncias de 1200 e 2200 metros, Figura 7.3(a). Já o nível de potência recebida na Estação São Gabriel, localizada a 1016 metros do transmissor, apresentou diferença em toda distribuição do seu perfil vertical, Figura 7.3 (b).

A Tabela 7.1 apresenta os valores de potência recebida pelo receptor a uma altura de 2 metros do solo e localizado na Estação São Gabriel, de acordo com os parâmetros de simulação mencionados anteriormente. Observa-se que as soluções computacionais considerando o retroespalhamento, 2W-SSPE, não obtiveram melhoras significativas em relação ao valor real medido em campo quando comparadas aos resultados das soluções que não consideram o campo no sentido reverso, 1W-SSPE.

Tabela 7.1 - Resultados computacionais e valor medido.

	1W-SSPE		Medição	2W-SSPE	
	NAPE	WAPE	Real	NAPE	WAPE
Valor (dBm)	-88,24	-56,92	-76	-88,46	-56,72
Erro Absoluto (dB)	12,24	19,08	0	12,46	19,28

Contudo, é importante frisar que conforme observado na Figura 7.2 (b) o campo gerado pelo retroespalhamento pode ser relevante em algumas regiões no ambiente de propagação, no entanto não foi significativo no local onde se situa a Estação São Gabriel. Sendo assim, surge a necessidade de realizar mais simulações e comparações para avaliar a eficácia da contribuição do campo reverso em situações de propagação realísticas.

7.2 Interface gráfica do usuário

Em informática, a interface gráfica do usuário, também conhecida como GUI (*Graphical User Interface*), permite a interação com o programa desenvolvido por meio de elementos gráficos, como ícones e indicadores visuais, ao invés de utilizar as linhas de comando no compilador.

O *software* MATLAB disponibiliza recursos para confecção dessas interfaces, sendo possível misturar elementos gráficos e de textos que fornecerão algum tipo de informação útil para o utilizador. Também é possível criar ícones de comando, menu de seleção, dentre outros.

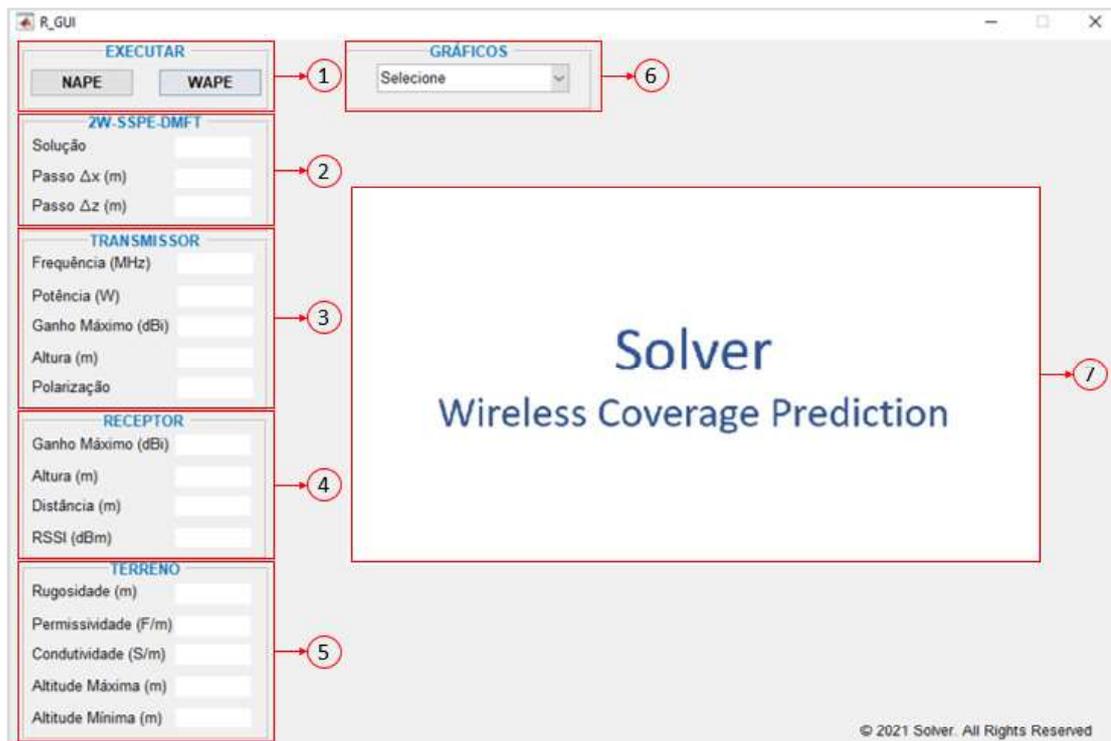
Foi desenvolvida uma GUI para o programa final desenvolvido nesse trabalho, o qual foi batizado de *Solver – Wireless Coverage Prediction*. Nela são apresentadas as principais informações de entrada da simulação e também os parâmetros de saída, através de gráficos e caixas de texto.

A tela inicial da interface gráfica é apresentada na Figura 7.4. Nela foram destacadas algumas regiões de grande importância funcional que foram numeradas de 1 a 7. A Tabela 7.2 informa a descrição de cada uma.

Tabela 7.2 - Descritivo da interface gráfica do usuário.

Região	Funcionalidade
1	Botões de comando que executam o programa para solução desejada.
2	Caixas de texto com informações sobre a técnica numérica.
3	Caixas de texto com informações sobre o sistema de transmissão.
4	Caixas de texto com informações sobre o sistema de recepção.
5	Caixas de texto com informações sobre o perfil topográfico.
6	Menu que seleciona o gráfico que será mostrado na Região 7: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapa do campo direto; ▪ Mapa do campo reverso; ▪ Mapa do campo total; ▪ <i>Path Loss</i>; ▪ Potência na recepção; ▪ Rugosidade; ▪ Perfil topográfico do terreno; ▪ Perfil vertical do campo inicial gerado pela antena transmissora.
7	Caixa gráfica para apresentação de figuras.

Figura 7.4 - Interface gráfica do programa de predição de cobertura desenvolvido.



As Figuras 7.5 e 7.6 apresentam a interface gráfica em operação após o usuário selecionar o comando para simulação NAPE e WAPE, respectivamente. Note que o botão executado fica na cor verde, indicando a opção selecionada.

Figura 7.5 - Apresentação de resultados para Solução NAPE pela GUI.

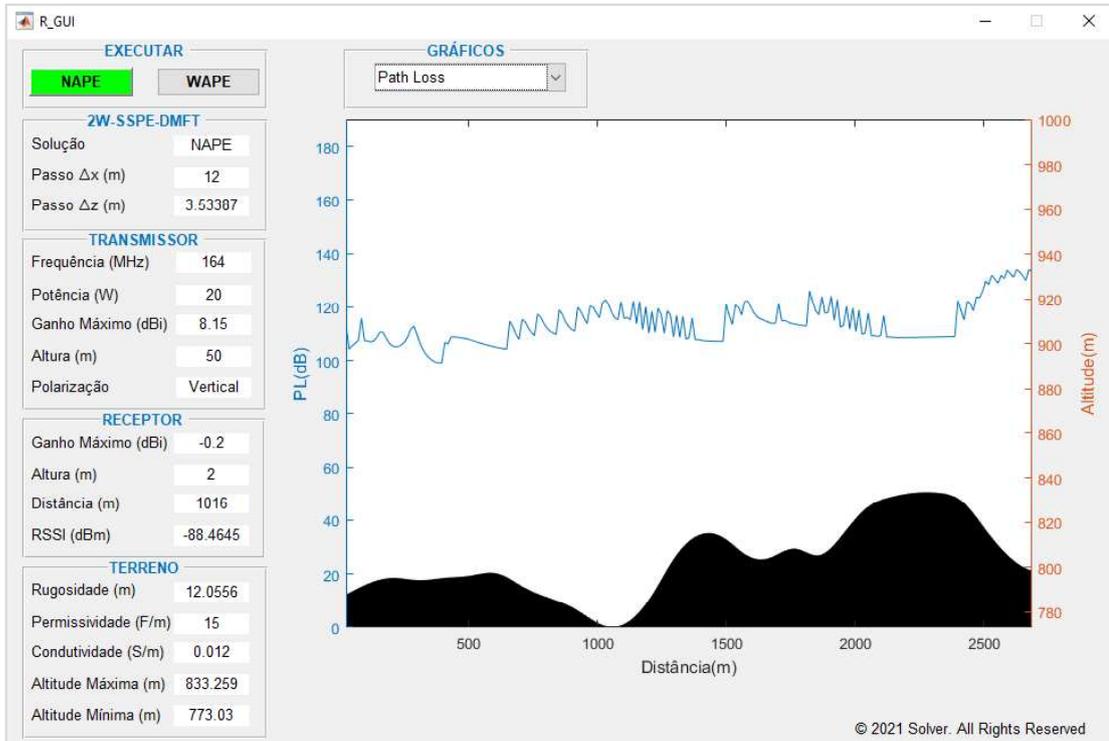
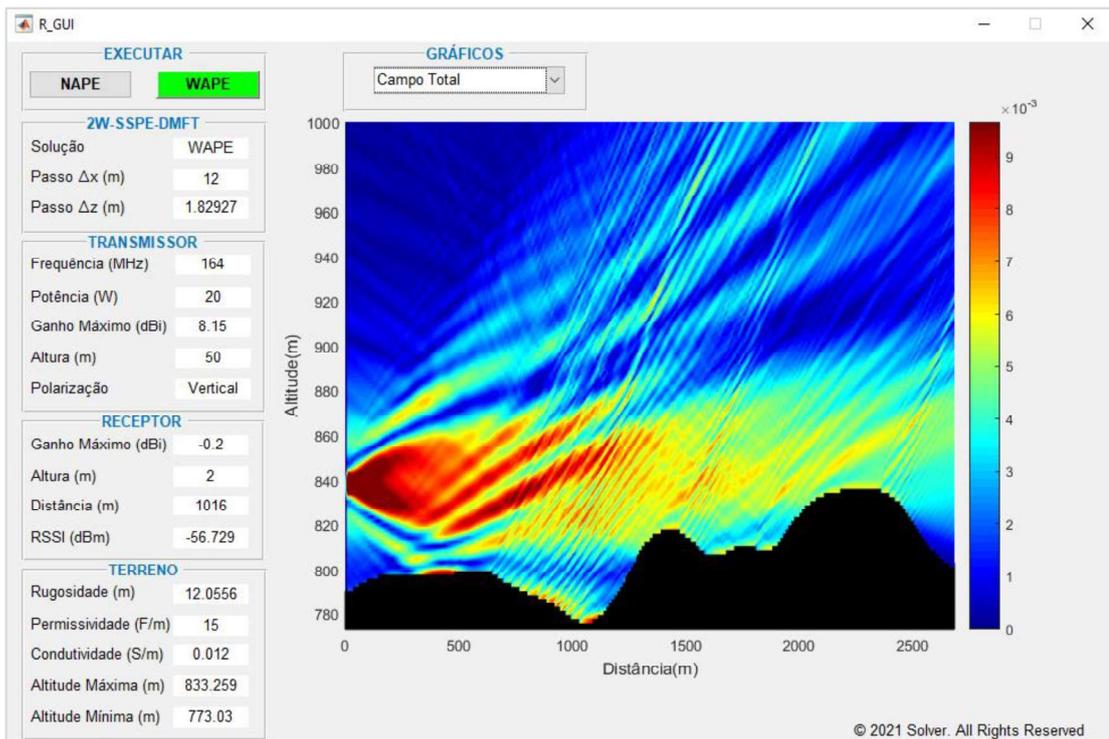


Figura 7.6 - Apresentação de resultados para Solução WAPE pela GUI.



7.3 Propostas de continuidade

Nesta seção são elencadas algumas propostas de continuidade para trabalhos futuros, que se referem a tópicos não abordados no desenvolvimento deste estudo:

- Desenvolver um propagador para análise tridimensional (3D) da propagação do campo em ambientes realísticos *indoor* e *outdoor*;
- Ampliar a aplicação do algoritmo para tratar cenários com terrenos mistos;
- Realizar simulações e comparações com outros modelos computacionais para avaliar a eficácia da contribuição do retroespalhamento implementado neste trabalho;
- Realizar simulações e comparações em outras faixas de frequência com diferentes perfis topográficos para analisar o grau de validade dos agrupamentos propostos para as soluções NAPE e WAPE, avaliando principalmente a rugosidade em relação ao comprimento de onda do sinal;
- Desenvolver uma aplicação que integre de forma automática o programada de predição de cobertura desenvolvido com os *softwares* utilizados para extração de dados: QGIS e WebPlotDigitizer.

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÃO

Os objetivos iniciais desse trabalho podem ser divididos em dois tópicos: o primeiro consistia em aprimorar uma ferramenta computacional de predição de cobertura radioelétrica para que pudesse manipular parâmetros de enlaces realísticos, e o segundo em simular casos práticos de uma campanha de medições em campo e comparar as previsões com os valores reais com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo.

Para alcançar os resultados do primeiro tópico, foram desenvolvidas metodologias práticas e eficientes para extração de dados do diagrama de radiação das antenas e do perfil topográfico do enlace, utilizando programas gratuitos e de grande utilização nos meios públicos e acadêmicos. Além disso foram implementados como variáveis de saída do programa dois parâmetros de grande interesse em análise de radiopropagação: a rugosidade do terreno e o nível de potência recebida.

Para alcançar os resultados do segundo tópico, foi utilizada como base de dados as medições um estudo de radiopropagação realizado ao longo de uma via férrea. Na comparação, inicialmente correlacionou-se as características de distância e de rugosidade dos enlaces para definir a resposta computacional adequada, NAPE ou WAPE, e posteriormente realizada uma análise estatística direcionada ao erro absoluto através de gráficos e parâmetros calculados, como média e desvio padrão. De posse dos resultados obtidos, foi observado que a ferramenta computacional apresentou boa convergência entre seus resultados e as medições em campo, demonstrando uma validação positiva do algoritmo.

Após concluir os objetivos iniciais desse estudo, foi proposto e realizado o desafio de implementar no código do programa um algoritmo que pudesse adicionar os efeitos de retroespalhamento do campo. Seus efeitos foram avaliados em um dos enlaces da campanha de medições e trabalhos futuros poderão comprovar sua eficácia comparando seus resultados com os de outras técnicas computacionais. Por fim, com o intuito de melhorar a experiência do usuário com o programa desenvolvido, foi criada uma interface gráfica amigável para apresentação dos parâmetros simulados e os respectivos resultados computacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Garcia, “*Propagador baseado em janela deslizante com formulação FDTD incondicionalmente estável de alta ordem*”. Tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2012.
- [2] D. Andrés Parada Rozo, “*Métodos de equação parabólica aplicados à previsão de cobertura radioelétrica*”. Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFMG, 2018.
- [3] J. D. Parsons, “*The Mobile radio Propagation Channel*”, 2nd edition. John Wiley & Sons, 2000.
- [4] GOMES, Geraldo Gil Ramundo, “*Sistemas de Radioenlaces Digitais: Terrestres e por Satélites*”. São Paulo: Érica, 2013.
- [5] International Communication Union, “*ITU-R P. 453-14 The radio refractive index: its formula and refractivity data*”, ITU Recommendation”, August 2019.
- [6] PORTELA, C. “*Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior*”. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatability. Rio de Janeiro: 1999.
- [7] MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 29 Dez. 2020.
- [8] Apaydin, G. and L. Sevgi, “*The Split-Step Fourier and Finite-Element Based Parabolic-Equation Propagation Prediction Tools: Canonical Tests, Systematic Comparisons, and Calibration*”, in IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine number, vol. 52, no. 3, 2010. p. 66-79.
- [9] Abdelmoaty, Ahmed. “*Channel Modeling for Over-water Communications*”. École de Technologie Supérieure Université du Québec. Montreal, December, 2018.
- [10] T Saxena, R Raj, JS Jadon, N Arora, “*RF Survey and Drive Test: the Very First Step towards Network Planning*”, in International Conference on Recent Trends in Computing (ICRTC), 2010. p. 42-48.
- [11] Molisch, Andreas F., “*Wireless communications*”, 2nd edition. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] G. Apaydin and L. Sevgi, “*Radio wave propagation and parabolic equation modeling*”. Wiley, 2017.
- [13] M. Leontovich and V. Fock, “*Solution of propagation of electromagnetic waves along the earth’s surface by the method of parabolic equations*”, J. Phys. USSR 10, 1946.
- [14] Hardin, R.H. and F.D. Tappert, “*Applications of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations*”, in SIAM, vol. 15, 1973. p. 423,1973.

- [15] G. D. Dockery and G. C. Konstanzer, “Recent advances in prediction of tropospheric propagation using the parabolic equation”, Johns Hopkins APL Tech. Dig., vol. 8, no. 4, pp. 404–412, 1987.
- [16] G. D. Dockery, “Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, no. 10, pp. 1464–1470, 1987.
- [17] G. D. Dockery and J. R. Kuttler, “An improved impedance-boundary algorithm for Fourier split-step solutions of the parabolic wave equation”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 44, no. 12, pp. 1592–1599, 1996.
- [18] M. Levy, “Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation”. The institution of Electrical Engineers, 2000.
- [19] J. R. Kuttler, “Differences between the narrow-angle and wide-angle propagators in the split-step Fourier solution of the parabolic wave equation”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 47, no. 7, pp. 1131–1140, 1999.
- [20] O. Ozgun, G. Apaydin, M. Kuzuoglu, and L. Sevgi, “Petool: Matlab-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain”, Computer Physics Communications, vol. 182, no. 12, pp. 2638 – 2654, 2011.
- [21] V. Gadwal and A. Barrios, “Channel modeling using the parabolic equation for rf communications”, in MILCOM 2009 - 2009 IEEE Military Communications Conference, Oct 2009, pp. 1-6.
- [22] D. D. Wang, X. L. Xi, Y. R. Pu, J. F. Liu, and L. L. Zhou, “Parabolic equation method for loran-c asf prediction over irregular terrain,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 734–737, 2016.
- [23] C. A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design”, fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2016.
- [24] P. Zhang, L. Bai, Z. Wu, and F. Li, “Effect of window function on absorbing layers top boundary in parabolic equation,” in Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, July 2014, pp. 849–852.
- [25] F.J. Harris, “On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform”, proceedings of the IEEE, 1978, 66(1):51-83.
- [26] P. Valtr, “Short Course Computational methods for long-range radio wave propagation prediction”, in 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2017), Paris, 2017.
- [27] GAP Service: empresa especializada em serviços de radiocomunicação. Disponível em: < <http://www.gapservice.com.br/>>. Acesso em: 15 Jan. 2020

- [28] Motorola Solutions, Inc. MOTOTRBO Site Survey: application to help analyzing the signal coverage. Version 04.03. April, 2016.
- [29] QGIS Development Team. QGIS: Geographic Information System. Version 3.10.6. May, 2020. Website: < <https://qgis.org/en/site/> >. Accessed: June, 2020.
- [30] Rohatgi, Ankit. WebPlotDigitizer: Web based tool to extract data from plots, images, and maps. Version 4.2. July, 2020. Website: <<https://automeris.io/WebPlotDigitizer>>. Accessed: August, 2020.
- [31] L. Sevgi, “*Groundwave modeling and simulation strategies and path loss prediction virtual tools*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 6, pp. 1591– 1598, Jun. 2007.
- [32] Holm, Peter D., “*Wide-Angle Shift-Map PE for a Piecewise Linear Terrain - A Finite- Difference Approach*”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 55(10), outubro 2007.
- [33] MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C, “*Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*”. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009.
- [34] O. Ozgun, “*Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation,*” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 9, pp. 2706-2714, Sept. 2009.

APÊNDICE

Apêndice A - Rugosidade de um terreno

O coeficiente angular (m) de uma reta pode ser calculado através da Equação (A.1):

$$m = \frac{\Delta Z}{\Delta X} = \frac{Z - Z_0}{X - X_0}, \quad (\text{A.1})$$

onde o par ordenado (X_0, Z_0) é um ponto por onde ela passa. Portanto, podemos expressar Z em função de X por meio da Equação (A.2):

$$Z(X) = mX + (Z_0 - mX_0). \quad (\text{A.2})$$

Um perfil topográfico pode ser representado por um conjunto de pontos, conforme definido na Equação (A.3):

$$(X_i, Z_i) \rightarrow i = 0, 1, 2, 3 \dots N. \quad (\text{A.3})$$

Deseja-se aproximar esses pontos por uma reta que passe em (X_0, Z_0) . A melhor aproximação vem do método dos mínimos quadrados, representado pela Equação (A.4):

$$J(m) = \sum_{i=0}^N [Z_i - Z(X_i)]^2. \quad (\text{A.4})$$

Esse somatório pode ser reescrito substituindo a Equação (A.2) em (A.4), obtendo dessa forma a Equação (A.5):

$$J(m) = \sum_{i=0}^N [Z_i - m(X_i - X_0) - Z_0]^2. \quad (\text{A.5})$$

Para encontrar o valor de m , minimiza-se a função $J(m)$, através de derivada, de acordo com a Equação (A.6):

$$\frac{\partial [J(m)]}{\partial m} = 0. \quad (\text{A.6})$$

Uma vez encontrado o valor de m , podemos calcular a rugosidade (δ) através da Equação (A.7):

$$\delta^2 = \frac{J(m)}{N+1} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N [Z_i - m(Z_i - X_0) - Z_0]^2 \quad (\text{A.7})$$

ANEXO

Anexo A - Drive test

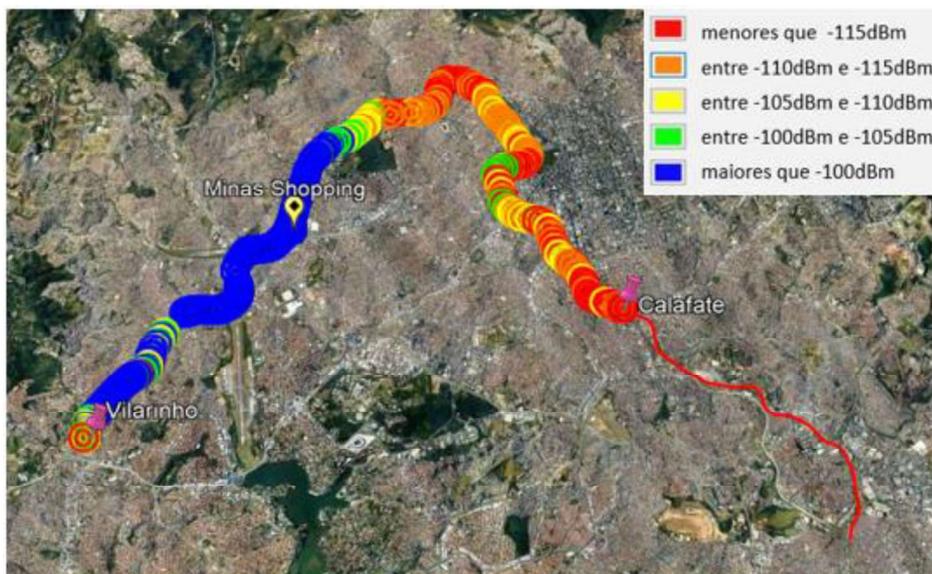
Com a repetidora instalada no site Minas Shopping, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Vilarinho e terminou com sua chegada na Estação Calafate. A antena foi instalada em uma torre existente no local, numa altura de 50 metros do solo, e foram coletadas um total de 245 medições, conforme Figuras (A.1) e (A.2).

Figura A.1: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Minas Shopping.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.2: Cobertura com a repetidora instalada em Minas Shopping.



Com a repetidora instalada no site CCO, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Santa Inês e terminou com sua chegada na Estação Vila Oeste. A antena foi instalada em um mastro no topo de um prédio local, numa altura de 35 metros do solo, e foram coletadas um total de 150 medições, conforme Figuras (A.3) e (A.4).

Figura A.3: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em CCO.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.4: Cobertura com a repetidora instalada em CCO.



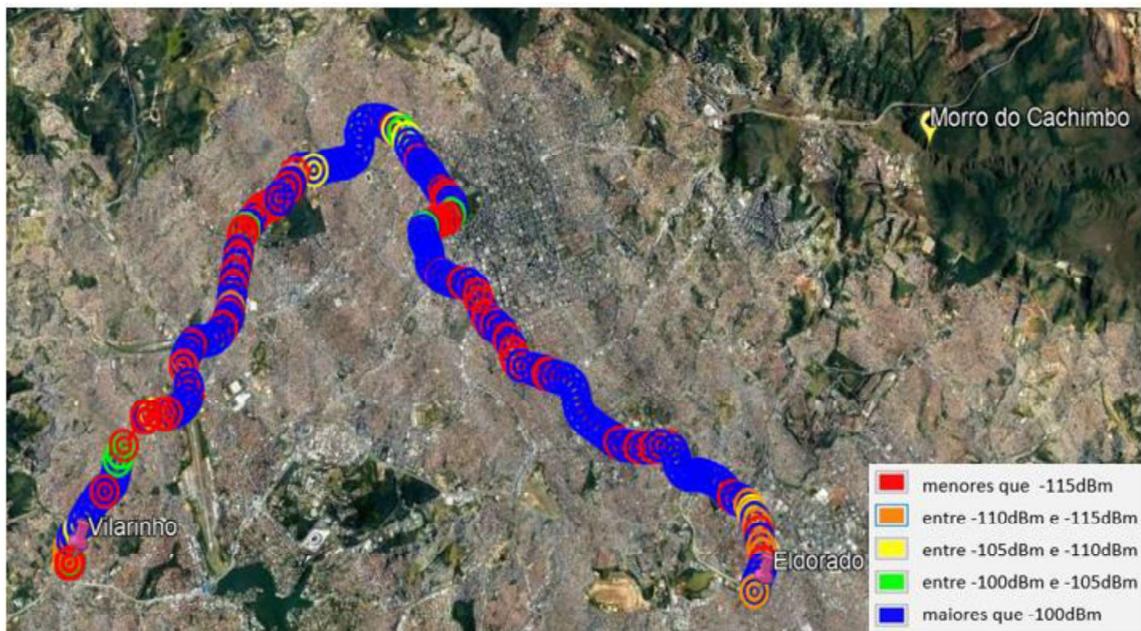
Com a repetidora instalada no site Morro do Cachimbo, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Vilarinho e terminou com sua chegada na Estação Eldorado. A antena foi instalada em uma torre existente no local, numa altura de 25 metros do solo, e foram coletadas um total de 300 medições, conforme Figuras (A.5) e (A.6).

Figura A.5: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Morro do Cachimbo.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.6: Cobertura com a repetidora instalada em Morro do Cachimbo.



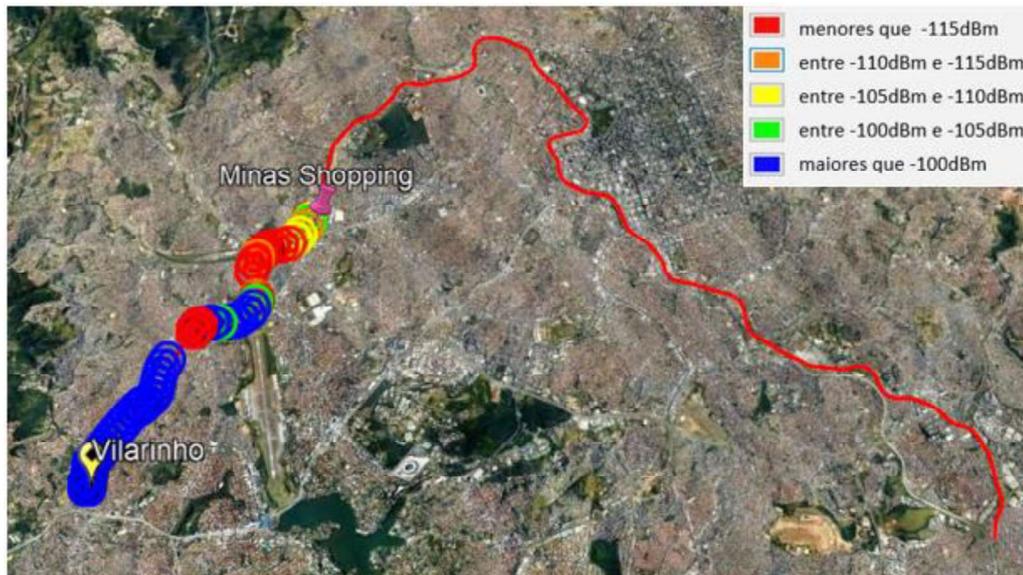
Com a repetidora instalada no site Vilarinho, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Vilarinho e terminou com sua chegada na Estação Minas Shopping. A antena foi instalada em um mastro no topo de um prédio local, numa altura de 25 metros do solo, e foram coletadas um total de 80 medições, conforme Figuras (A.7) e (A.8).

Figura A.7: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Vilarinho.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.8: Cobertura com a repetidora instalada em Vilarinho.



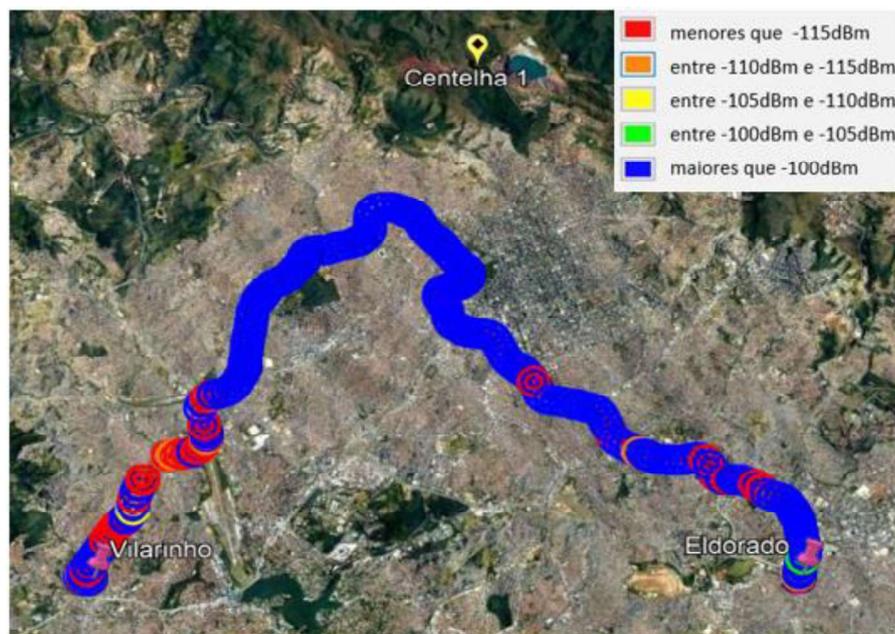
Com a repetidora instalada no site Centelha 1, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Vilarinho e terminou com sua chegada na Estação Eldorado. A antena foi instalada em um mastro, numa altura de 3 metros do solo, e foram coletadas um total de 320 medições, conforme Figuras (A.9) e (A.10).

Figura A.9: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Centelha 1.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.10: Cobertura com a repetidora instalada em Centelha 1.



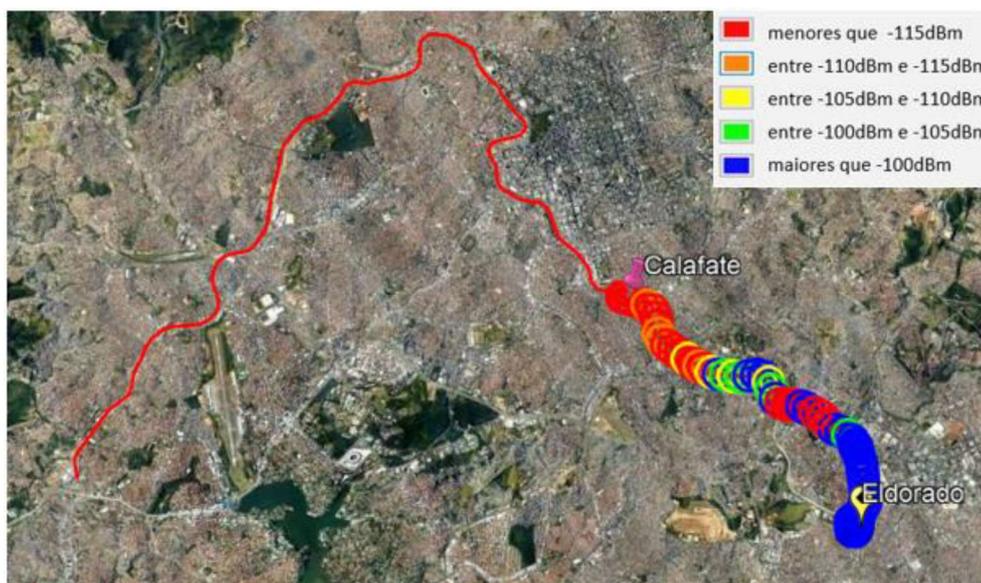
Com a repetidora instalada no site Eldorado, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Eldorado e terminou com sua chegada na Estação Calafate. A antena foi instalada em um mastro no topo de um prédio local, numa altura de 15 metros do solo, e foram coletadas um total de 120 medições, conforme Figuras (A.11) e (A.12).

Figura A.11: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Eldorado.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.12: Cobertura com a repetidora instalada em Centelha 1.



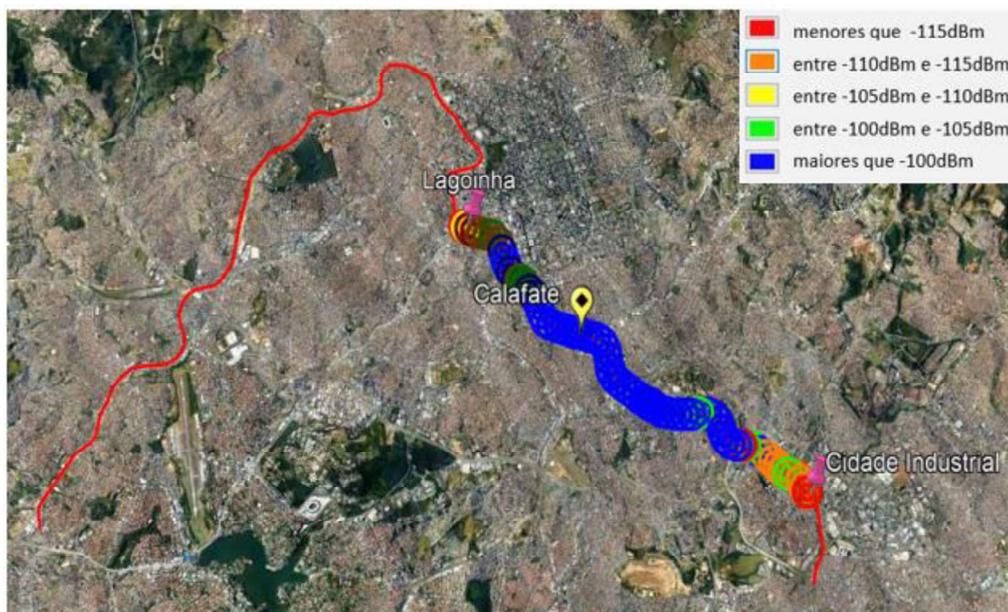
Com a repetidora instalada no site Calafate, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Lagoinha e terminou com sua chegada na Estação Cidade Industrial. A antena foi instalada em um mastro no topo de um prédio local, numa altura de 20 metros do solo, e foram coletadas um total de 100 medições, conforme Figuras (A.13) e (A.14).

Figura A.13: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Calafate.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.14: Cobertura com a repetidora instalada em Calafate.



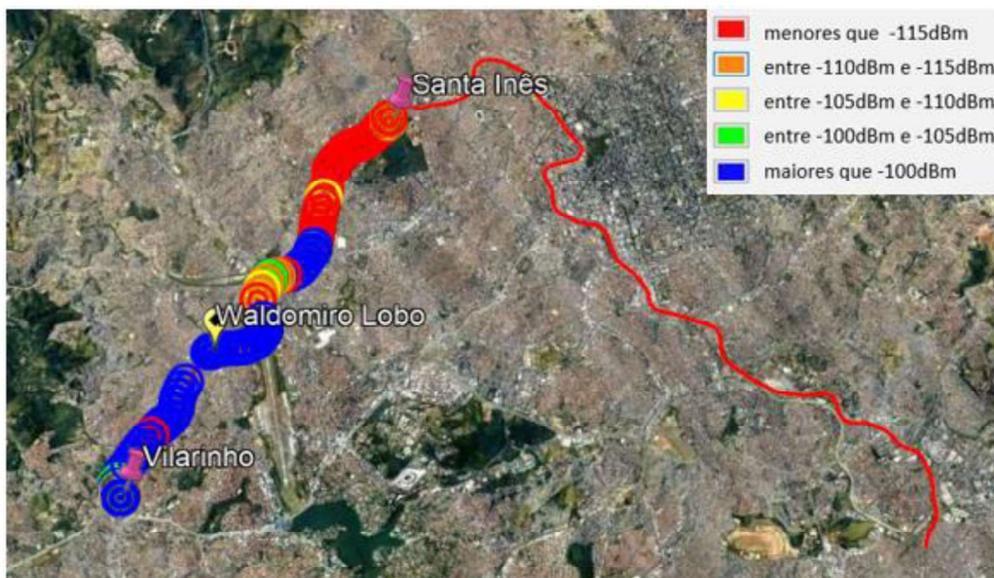
Com a repetidora instalada no site Waldomiro Lobo, o teste se iniciou com o trem partindo da Estação Vilarinho e terminou com sua chegada na Estação Santa Inês. A antena foi instalada em um mastro no topo de uma caminhonete, numa altura de 5 metros do solo, e foram coletadas um total de 150 medições, conforme Figuras (A.15) e (A.16).

Figura A.15: Equipamentos do sistema de transmissão instalados em Waldomiro Lobo.



Fonte: Estudo de propagação realizado pela GAP.

Figura A.16: Cobertura com a repetidora instalada em Waldomiro Lobo.



Anexo B - Resultados computacionais e medições em campo.

Tabela B.1 - Resultados obtidos para os 88 enlaces analisados

Enlace	Local de Transmissão	Local de Recepção	Nape (dBm)	Wape (dBm)	Real (dBm)	Rugosidade (metros)	Distância (metros)	Melhor Resultado
1	Minas Shopping	Vilarinho	-109,29	-82,57	-105,00	20,6053	6093	NAPE
2	Minas Shopping	Floramar	-109,38	-76,27	-104,00	19,1501	4540	NAPE
3	Minas Shopping	Waldomiro Lobo	-93,76	-73,29	-89,00	11,7474	2839	NAPE
4	Minas Shopping	Primeiro de Maio	-87,81	-67,82	-79,00	5,4407	1841	NAPE
5	Minas Shopping	São Gabriel	-88,24	-56,92	-76,00	7,77	1015	NAPE
6	Minas Shopping	Minas Shopping	-84,96	-66,90	-57,00	0	155	WAPE
7	Minas Shopping	José Cândido	-103,73	-93,07	-95,00	6,4179	1788	WAPE
8	Minas Shopping	Santa Inês	-117,05	-91,58	-106,00	28,6945	2966	NAPE
9	Minas Shopping	Horto	-125,86	-86,13	-117,00	26,4028	3947	NAPE
10	Minas Shopping	Santa Tereza	-121,03	-96,16	-114,00	29,7922	5209	NAPE
11	Minas Shopping	Santa Efigênia	-116,07	-98,48	-113,00	18,9181	5226	NAPE
12	Minas Shopping	Central	-118,26	-85,32	-118,00	21,0147	4964	NAPE
13	Minas Shopping	Lagoinha	-119,38	-101,02	-116,00	18,8708	4843	NAPE
14	Minas Shopping	Carlos Prates	-121,47	-91,90	-119,00	18,9923	5968	NAPE
15	Minas Shopping	Calafate	-127,87	-106,95	-121,00	27,4134	7267	NAPE
16	CCO	Santa Inês	-110,49	-74,15	-102,00	15,7218	3187	NAPE
17	CCO	Horto	-104,94	-70,26	-110,00	10,4797	2379	NAPE
18	CCO	Santa Tereza	-99,65	-70,00	-109,00	7,1084	2367	NAPE
19	CCO	Santa Efigênia	-94,58	-68,31	-97,00	8,3379	1498	NAPE
20	CCO	Central	-75,80	-59,02	-58,00	9,5693	471	WAPE
21	CCO	Lagoinha	-79,70	-56,74	-78,00	6,9482	819	NAPE
22	CCO	Carlos Prates	-102,33	-67,62	-91,00	13,5708	2350	NAPE
23	CCO	Calafate	-99,22	-72,28	-102,00	11,5162	3877	NAPE
24	CCO	Gameleira	-98,34	-78,49	-99,00	10,3943	5864	NAPE
25	CCO	Vila Oeste	-104,70	-85,27	-106,00	12,2505	7675	NAPE
26	Morro do Cachimbo	Vilarinho	-121,23	-101,55	-107,00	147,59	21003	WAPE
27	Morro do Cachimbo	Floramar	-116,55	-92,18	-97,00	141,5646	19764	WAPE
28	Morro do Cachimbo	Waldomiro Lobo	-107,88	-88,18	-91,00	127,667	18454	WAPE
29	Morro do Cachimbo	Primeiro de Maio	-113,57	-96,16	-73,00	123,8833	17333	WAPE
30	Morro do Cachimbo	São Gabriel	-108,95	-83,86	-87,00	115,0448	16982	WAPE
31	Morro do Cachimbo	Minas Shopping	-110,84	-89,32	-81,00	112,1364	16056	WAPE
32	Morro do Cachimbo	José Cândido	-120,80	-88,36	-87,00	107,7438	15401	WAPE
33	Morro do Cachimbo	Santa Inês	-114,72	-92,36	-89,00	92,5187	14359	WAPE
34	Morro do Cachimbo	Horto	-109,54	-89,70	-87,00	81,3074	13180	WAPE
35	Morro do Cachimbo	Santa Tereza	-110,46	-86,69	-94,00	74,423	12088	WAPE
36	Morro do Cachimbo	Santa Efigênia	-113,73	-89,85	-82,00	80,2945	11418	WAPE
37	Morro do Cachimbo	Central	-115,12	-95,97	-109,00	89,582	11203	NAPE
38	Morro do Cachimbo	Lagoinha	-105,71	-95,15	-89,00	97,0813	11219	WAPE
39	Morro do Cachimbo	Carlos Prates	-112,84	-91,45	-87,00	111,7295	10366	WAPE
40	Morro do Cachimbo	Calafate	-111,67	-87,97	-68,00	114,4104	9642	WAPE
41	Morro do Cachimbo	Gameleira	-104,28	-78,36	-79,00	114,9784	9083	WAPE

42	Morro do Cachimbo	Vila Oeste	-102,20	-80,98	-76,00	123,7002	8311	WAPE
43	Morro do Cachimbo	Cidade Industrial	-104,88	-84,84	-108,00	123,688	8239	NAPE
44	Morro do Cachimbo	Eldorado	-104,59	-83,22	-82,00	124,438	9599	WAPE
45	Vilarinho	Vilarinho	-74,35	-52,75	-55,00	0	94	WAPE
46	Vilarinho	Floramar	-89,56	-69,40	-82,00	7,5935	1563	NAPE
47	Vilarinho	Waldomiro Lobo	-91,53	-70,55	-96,00	15,4324	3289	NAPE
48	Vilarinho	Primeiro de Maio	-107,21	-85,45	-114,00	13,8414	4270	NAPE
49	Vilarinho	São Gabriel	-114,87	-91,47	-121,00	17,3625	5128	NAPE
50	Vilarinho	Minas Shopping	-112,64	-88,35	-108,00	19,1608	6093	NAPE
51	Centelha 1	Vilarinho	-113,26	-90,23	-87,00	158,1179	14984	WAPE
52	Centelha 1	Floramar	-116,72	-88,10	-92,00	155,2956	13433	WAPE
53	Centelha 1	Waldomiro Lobo	-113,38	-90,90	-97,00	151,6986	11714	WAPE
54	Centelha 1	Primeiro de Maio	-104,13	-89,29	-86,00	140,6259	10720	WAPE
55	Centelha 1	São Gabriel	-115,27	-82,10	-89,00	140,2309	9867	WAPE
56	Centelha 1	Minas Shopping	-113,71	-87,37	-82,00	137,2725	8896	WAPE
57	Centelha 1	José Cândido	-111,92	-82,85	-82,00	122,1389	7291	WAPE
58	Centelha 1	Santa Inês	-95,15	-80,07	-78,00	102,1337	5980	WAPE
59	Centelha 1	Horto	-97,73	-77,29	-56,00	74,0006	4963	WAPE
60	Centelha 1	Santa Tereza	-100,43	-83,06	-63,00	45,0591	3792	WAPE
61	Centelha 1	Santa Efigênia	-100,80	-85,22	-80,00	67,3757	4289	WAPE
62	Centelha 1	Central	-116,73	-114,63	-90,00	77,791	5326	WAPE
63	Centelha 1	Lagoinha	-95,67	-69,72	-76,00	84,419	6382	WAPE
64	Centelha 1	Carlos Prates	-122,64	-91,42	-91,00	76,9809	7401	WAPE
65	Centelha 1	Calafate	-119,16	-88,03	-85,00	94,3065	8528	WAPE
66	Centelha 1	Gameleira	-110,46	-76,46	-90,00	104,6063	10184	WAPE
67	Centelha 1	Vila Oeste	-119,03	-95,49	-84,00	111,4368	11518	WAPE
68	Centelha 1	Cidade Industrial	-117,68	-85,08	-87,00	115,7408	12922	WAPE
69	Centelha 1	Eldorado	-122,90	-96,10	-111,00	125,5485	14293	NAPE
70	Eldorado	Eldorado	-63,49	-45,40	-41,00	0,0025	180	WAPE
71	Eldorado	Cidade Industrial	-115,07	-107,00	-89,00	10,3983	1628	WAPE
72	Eldorado	Vila Oeste	-120,72	-94,80	-117,00	23,3385	2854	NAPE
73	Eldorado	Gameleira	-126,03	-98,12	-121,00	22,2226	4505	NAPE
74	Eldorado	Calafate	-117,05	-90,85	-115,00	24,2827	6490	NAPE
75	Calafate	Cidade Industrial	-121,47	-102,41	-122,00	8,8395	5457	NAPE
76	Calafate	Vila Oeste	-96,56	-81,02	-100,00	5,97903	3831	NAPE
77	Calafate	Gameleira	-83,95	-63,10	-81,00	2,6617	1979	NAPE
78	Calafate	Calafate	-67,20	-48,85	-47,00	0	106	WAPE
79	Calafate	Carlos Prates	-88,67	-64,97	-104,00	5,7	1546	NAPE
80	Calafate	Lagoinha	-96,05	-71,39	-109,00	8,8508	3101	NAPE
81	Waldomiro Lobo	Santa Inês	-130,95	-94,86	-110	19,7174	5821	WAPE
82	Waldomiro Lobo	José Cândido	-122,73	-80,15	-124,00	19,2081	4537	NAPE
83	Waldomiro Lobo	Minas Shopping	-106,46	-75,60	-99,00	13,0599	2911	NAPE
84	Waldomiro Lobo	São Gabriel	-110,03	-70,96	-107,00	15,945	1913	NAPE
85	Waldomiro Lobo	Primeiro de Maio	-95,53	-60,09	-94,00	4,4727	1208	NAPE
86	Waldomiro Lobo	Waldomiro Lobo	-55,91	-40,14	-40,00	0	84	WAPE
87	Waldomiro Lobo	Floramar	-95,70	-54,67	-97,00	5,4254	1664	NAPE
88	Waldomiro Lobo	Vilarinho	-101,87	-85,82	-100,00	14,2801	3224	NAPE

