Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Christian Fragoas Fernandez Rodrigues

Contribuições ao Projeto de Cobertura em TV Digital Aberta Usando Otimização

Rio de Janeiro
2018

Christian Fragoas Fernandez Rodrigues

Contribuições ao Projeto de Cobertura de TV Digital Aberta Usando Otimização

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Orientador: Prof. Lisandro Lovisolo

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

R696 Rodrigues, Christian Fragoas Fernandez.
Contribuição ao projeto de cobertura em TV digital aberta usando otimização / Christian Fragoas Fernandez Rodrigues. – 2018.
149f.

Orientador: Lisandro Lovisolo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Televisão digital - Teses. 3. Televisão a cores - Transmissores e transmissão - Teses. 4. Conversores de frequência - Teses. I. Lovisolo, Lisandro. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 621.397.2

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Christian Fragoas Fernandez Rodrigues

Modelos de Otimização para Projetos de Cobertura em Radiofrequência

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Aprovado em:

Banca Examinadora

_____

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo

Faculdade de Engenharia - UERJ

_____

Prof. Dr. Maurício Dias

Faculdade de Engenharia - CEFET/RJ

_____

Prof. Dr. Michel Pompeo Tcheou

Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2018

AGRADECIMENTOS

A minha companheira Eleonora, por todo apoio, paciência e companheiros durante essa jornada. Sua ajuda foi literalmente essencial para a conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Lisandro Lovisolo, por toda a ajuda, pela excelente orientação, apontando os melhores caminhos para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade demonstrada todos esses anos de graduação e pós-graduação.

Ao amigo Lucas Muratori, pelo apoio e tempo disponibilizado na elaboração desse trabalho.

Ao amigo Daniel Monteiro, pela ajuda e recursos disponibilizados para o término desse trabalho. Sem esses recursos seria impossível a sua conclusão.

Aos meus amigos de trabalho pela paciência durante esse período.

À UERJ, pela oportunidade e porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que embora não citados, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

A única maneira de definir o limite do impossível
é ir além dele, para o impossível.
Arthur C. Clarke

RESUMO

RODRIGUES, Christian Fragoas Fernandez. *contribuições ao projeto de cobertura em tv digital aberta usando otimização.* 2018. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Considerando a possível adoção de tecnologias MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para a radiodifusão de televisão digital em resolução 8K, esta dissertação parte de experimentos com um sistema de transmissão MIMO OFDM (*Otrhogonal Frequency Division Multiplexing*) 4096 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) em ambiente urbano. Os dados experimentais permitem comparar as atenuações medidas nas polarizações horizontal e vertical, no que se observa pequenas diferenças. De forma a contribuir com projetos de tais sistemas, a cobertura de sistemas de radiodifusão, os dados experimentais são empregados para otimizar (sintonizar) os parâmetros do modelo de propagação ITU R-P.1546; para isso, utiliza-se os métodos gradiente descendente e Newton-Raphson de forma a encontrar o conjunto de parâmetros que minimiza o erro médio quadrático entre a perda de percurso prevista pelo modelo e a medida. Essa otimização é realizada nas polarizações horizontal e vertical isoladamente e conjuntamente. Como resultado obtêm-se conjuntos de parâmetros que conferem maior acurácia ao modelo ITU R-P.1546. A seguir, considera-se o projeto de cobertura de redes de frequência única (SFN - *Single Frequency Network*). Propõe-se um algoritmo heurístico para obter posições de estações que permitam cobrir uma região de interesse com uma intensidade mínima de sinal. A cobertura obtida é avaliada e heurísticas são empregadas para buscar por configurações do sistema, a alocação das localizações das antenas da SFN, que melhorem o desempenho. As heurísticas consideram informações de relevo e a sobreposição de coberturas entre diferentes estações transmissoras. O algoritmo proposto é iterativo e como resultado final fornece uma quantidade de transmissores e suas localizações de forma a atender uma região satisfazendo um patamar de intensidade de sinal. Assim, esta dissertação aborda aspectos que permitem facilitar projetos de sistemas de radiodifusão, principalmente de SFNs, na faixa de UHF. Os resultados são bastante promissores, pois a otimização dos parâmetros do modelo ITU R-P.1546 melhora a acurácia da predição de cobertura do mesmo e a heurística proposta permite obter posições candidatas para a implementação de SFNs, para posterior *survey*.

Palavras-chave: Propagação; Otimização; ITU R-P1546; Projeto de cobertura; TV Digital; SFN.

ABSTRACT

RODRIGUES, Christian Fragoas Fernandez. *contributions to the digital television project using optimization.* 2018. 149p. Dissertation (Masters Degree in Electronic Engineering) – Engineering College, Rio de Janeiro State University, Rio de Janeiro, 2018.

Considering the possible MIMO (Multiple Input Multiple Output) technology adoption for 8K resolution digital television broadcasting, this dissertation part from experiments with a MIMO OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 4096 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) transmission system in urban environment. The experimental data allow to compare the attenuations measured in horizontal and vertical polarizations, in which small differences are observed. In a way to contribute with the projects of such systems, the broadcasting systems coverage, the experimental data is employed to optimize (tune) the ITU R-P.1546 propagation model parameters; to that end, descendent gradient and Newton-Raphson methods are used to find the parameter set which minimizes the quadratic medium error between the route loss foreseen by the model and the one measured. This optimization is realized in horizontal and vertical polarizations separate and conjunctionally. As a result, parameter sets that confer higher accuracy to the ITU R-P.1546 model are obtained. Next, the SFN (Single Frequency Network) coverage project is considered. An heuristic algorithm is proposed to obtain station positions that allow to cover an interest region with minimum signal intensity. The obtained coverage is evaluated and heuristics are employed to search for system configurations, SFN antennas localizations allocation, which improve performance. The heuristics consider terrain informations and coverage superpositions between different transmitting stations. The proposed algorithm is interactive and supplies as final result a transmitter quantity and its locations in order to supply a region satisfying an intensity signal baseline. Thus, this dissertation approaches aspects that facilitate broadcasting systems projects, mainly SFNs in the UHF bandwidth. The results are quite promising, the optimization of ITU-R P.1546 model parameters improves its coverage prediction accuracy and the proposed heuristic allows to obtain candidate positions to implement SFNs, to further survey.

Keywords: MIMO; 8K; Propagation; Optimization; ITU R-P1546; Coverage Project; Digital Television; SFN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação da densidade das subportadoras do padrão ISDB-TB (superior) e ISDB-Tn (inferior). 24
Figura 2 – Comparação entre os comprimentos temporais dos símbolos do padrão ISDB-TB e ISDB-Tn. 25
Figura 3 – Constelações de símbolos modulados em 64QAM (esquerda) e 4096QAM (direita) 26
Figura 4 – Configuração MIMO com antenas 2x2. 27
Figura 5 – Na parte superior, ondas se propagando na polarização horizontal e na inferior ondas se propagando na polarização horizontal e vertical simultaneamente. 28
Figura 6 – Exemplo de abertura angular necessária para o atendimento de um pequeno município. 29
Figura 7 – Ângulo de elevação entre transmissor e receptor. 30
Figura 8 – Diagrama de uma antena tipo *slot* de 6 fendas que atende os requisitos estimados na Tabela 2 [24]. 31
Figura 9 – Mancha de cobertura para um limiar de 58 dBµV/m e potência EIRP de transmissão de 100 W. 32
Figura 10 –Sobreposição de coberturas para o atendimento do município do Rio de Janeiro. 33
Figura 11 – Utilização do IG para a mitigação da interferência intersimbólica. 35
Figura 12 – Curva de intensidade de campo eletromagnético dada a distância na frequência de 100 MHz [7]. 37
Figura 13 – Curva de intensidade de campo eletromagnético pela distância na frequência de 569 MHz interpolada utilizando a Equação (9). 41
Figura 14 – Setup de transmissão de sinais padrão ISDB-Tn utilizado no período de testes. 42
Figura 15 – Equipamentos utilizados para transmissão do sinal ISDB-Tn. A – Modulador, B – Excitador, C – Excitadores, D - Amplificadores. 43
Figura 16 – Antena de transmissão utilizada na demonstração. 45
Figura 17 – Cortes do diagrama horizontal e vertical da antena de transmissão polarizada horizontalmente. 46

Figura 18 – Cortes do diagrama horizontal e vertical da antena de transmissão polarizada verticalmente. 46
Figura 19 – Diagrama de medidas utilizado neste trabalho. 47
Figura 20 – Carro de medidas com mastro utilizado na campanha. 48
Figura 21 – Setup de medidas montado na bancada no interior do carro. 49
Figura 22 – *Display* do analisador experimental com todas as suas medidas. 49
Figura 23 – Pontos de coleta em vermelho na mancha de atendimento prevista da estação transmissora, em amarelo. 51
Figura 24 – Medidas de intensidade de campo elétrico por polarização em função da distância nos pontos de medidas mostrados na Figura 23. 52
Figura 25 – Resultado de 24 horas da medida fixa realizada na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 53
Figura 26 – *Setup* de medidas montado para realização da medida fixa na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 53
Figura 27 – Distribuição das medidas feitas em campo nas polarizações horizontal (vermelho) e vertical (azul) 54
Figura 28 – Desempenho do Algoritmo do Gradiente Descendente para a polarização horizontal, MSE x iteração. 64
Figura 29 - Desempenho do Algoritmo do Gradiente Descendente para a polarização vertical, MSE x iteração. 64
Figura 30 - Desempenho do Algoritmo do Gradiente Descendente para as polarizações horizontal e vertical, MSE x iteração. 65
Figura 31 – Curvas de atenuação da norma ITU-R P.1546 otimizadas pelo método do Gradiente Descente por polarização na frequência de 569,142857 MHz. 68
Figura 32 – Desempenho do Algoritmo de Newton-Raphson para a polarização horizontal, MSE x iteração. 69
Figura 33 - Desempenho do Algoritmo de Newton-Raphson para a polarização vertical, MSE x iteração. 70
Figura 34 - Desempenho do Algoritmo de Newton-Raphson para as polarizações horizontal e vertical, MSE x iteração. 71
Figura 35 - Curvas de atenuação da norma ITU-R P.1546 e otimizadas pelo método de Newton-Raphson por polarização na frequência de 569,142857 MHz. 74
Figura 36 - Exemplo de região de interesse (em amarelo) de 100x100 pixels sobre um relevo de 500x500 pixels. 79

Figura 37 - Vista superior da região de interesse da Figura 36. 80
Figura 38 – Cobertura de um transmissor na região de interesse do município de Queimados. 82
Figura 39 – Exemplo de Região de Interesse e as manchas de coberturas de uma SFN. 83
Figura 40 – Diagrama de blocos do método heurístico utilizado para a resolução do problema do atendimento da cobertura de uma região. 85
Figura 41 – Superfície de Voronoi (esquerda) gerada a partir dos máximos regionais (direita) da superfície de elevação. 86
Figura 42 – Transmissores e seus centroides mais próximos segundo a Equação (49). 88
Figura 43 – PCRI calculada a partir dors centroides mais próximos ao ponto em vermelho 89
Figura 44 – As curvas da ITU-R P.1546 tem maiores valores de campo para maiores valores da estação transmissora ($\mathrm{h1}$). 90
Figura 45 – PS calculado da superfície de elevação de teste. 91
Figura 46 – Exemplo dos 30% pontos mais elevados dos centroides fora da RI. 92
Figura 47 – Exemplo de $\mathrm{DCentroidesF}$ calculado da superfície de elevação de teste. 93
Figura 48 – Exemplo de RI em branco e seu centroide cf calculado (ponto azul). 94
Figura 49 – Superfície de aproximação do centroide dada a geometria da RI. 95
Figura 50 – Superfície formada pela soma normalizada entre as superfícies da Figura 47 e Figura 49. 96
Figura 51 – Exemplo de superfície PCob após 1250 iterações no relevo de teste. 98
Figura 52 – Exemplo de classificação no plano de PCob após 1250 iterações do algoritmo 99
Figura 53 – Exemplo da alteração de Raio conforme a estação transmissora se movimenta. 100
Figura 54 – Definindo a RB através da posição das estações transmissoras que possuem maior sobreposição entre as suas coberturas. 101
Figura 55 – Histogramas das variáveis Pcob e PS após a execução do algoritmo no grupo de teste. 103

Figura 56 - Histogramas de PCF e PCRI após a execução do algoritmo no grupo de teste. 103
Figura 57 – Exemplo do posicionamento inicial de estações no relevo de entrada utilizado pelo método. 108
Figura 58 –Deslocamento dos transmissores na superfície de elevação durante o processo iterativo. Os pontos vermelho, branco, verde e azul representam cada um uma das quatro estações da SFN. 110
Figura 59 – Desempenho do algoritmo na configuração de 4 estações transmissoras com passo de 150 repetições, cada passo com 20, 40, 60, 80 e 100% do centroides mais elevados por passo. 111
Figura 60 – Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 1 W. 112
Figura 61 - Vista tridimensional da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 1 W. 112
Figura 62 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 10 W. 113
Figura 63 - Vista tridimensional da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 10 W. 113
Figura 64 – Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 100 W. 114
Figura 65 - Vista tridimensional da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 100 W. 114
Figura 66 – Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na superfície de teste. 115
Figura 67 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na superfície de teste. 116
Figura 68 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de cinco estações (esquerda) e seis estações (direita) na superfície de teste. 116
Figura 69 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de sete estações (esquerda) e oito estações (direita) na superfície de teste. 117
Figura 70 - Gráfico da evolução do algoritmo para uma rede de nove estações na superfície de teste. 117
Figura 71 – Máxima cobertura conforme o incremento na quantidade de centroides utilizados. 119

Figura 72 – Quantidade de iterações necessárias até a saturação do algoritmo. ...120
Figura 73 – Mapa capturado do município de Queimados no estado do Rio de Janeiro. ...121
Figura 74 – Captura de satélite do município de Queimados no estado do Rio de Janeiro. ...122
Figura 75 – Recorte de Queimados gerado a partir dos dados de população obtidos em [53] e [54]. ...123
Figura 76 – Recorte de Queimados sobre o perfil de elevação extraído a partir de [53] e [54]. ...123
Figura 77 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 1 W. ...124
Figura 78 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 10 W. ...125
Figura 79 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 100 W. ...125
Figura 80 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W. ...126
Figura 81 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W. ...127
Figura 82 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de cinco estações (esquerda) e seis estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W. ...127
Figura 83 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de sete estações (esquerda) e oito estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W. ...128
Figura 84 - Gráfico da evolução do algoritmo para uma rede de nove estações na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W. ...128
Figura 85 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W. ...129

Figura 86 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W. 129
Figura 87 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de cinco estações (esquerda) e seis estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W. 130
Figura 88 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de sete estações (esquerda) e oito estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W. 130
Figura 89 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de nove na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W. 131
Figura 90 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 100 W. 131
Figura 91 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 100 W. 132
Figura 92 – Curvas de complexidade de busca do algoritmo ao utilizar todas as possibilidades de busca para a variação da quantidade de transmissores de 1 a 9. 137
Figura 93 - Curvas de complexidade de busca do algoritmo definido na seção 6.2 para a variação da quantidade de transmissores de 1 a 9. 140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre os padrões ISDB-TB e ISDB-Tn.....23
Tabela 2 – Características do diagrama da antena de transmissão estimados com as informações obtidas através das análises da Figura 6 e Figura 7.....31
Tabela 3 – Parâmetros hipotéticos utilizados e Pin calculado utilizando a Equação (4).....32
Tabela 4 – Características de Transmissão 43
Tabela 5 – Características do Sistema de Transmissão 45
Tabela 6 – Características do Sistema de Recepção.....50
Tabela 7 – Média e variância das distribuições de potência das medidas feitas nas polarizações horizontal e vertical 54
Tabela 8 – Comparação entre os parâmetros da ITU-R P.1546 e os otimizados pelo método do gradiente descendente 66
Tabela 9 – Comparativo entre os erros médio e máximo do modelo otimizado pelo método do gradiente descendente com o da ITU-R P.1546. 66
Tabela 10 – Comparativo dos resultados cruzados das otimizações no método do gradiente descendente.....67
Tabela 11 - Comparativo entre os erros médio e máximo do modelo otimizado pelo método de Newton-Raphson com o da ITU-R P.1546 em 100 interações.....72
Tabela 12 - Comparativo dos resultados cruzados das otimizações no método de Newton-Raphson.....72
Tabela 13 - Comparação entre os parâmetros da ITU-R P.1546 e os otimizados pelo método de Newton-Raphson.....73
Tabela 14 – Comparativo entre os modelos de predição otimizados pelos métodos Newton-Raphson e gradiente descente com o modelo da norma.....74
Tabela 15 – MSE (dB) resultante da validação cruzada em 10 repetições 76
Tabela 16 – Média e variância do MSE (dB) resultante da validação cruzada presente na Tabela 16 76
Tabela 17 – Valores utilizados para classificação da cobertura na RI 83
Tabela 18 - Constantes de calibração utilizadas na Equação (67).....103
Tabela 19 – Percentual de cobertura por potência EIRP de transmissão na melhor posição escolhida após a execução do algoritmo na região de teste.....115

Tabela 20 – Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados 118
Tabela 21 – Desempenho consolidado para todos os casos feitos na superfície de teste 118
Tabela 22 - Percentual de cobertura por potência EIRP de transmissão na melhor posição escolhida após a execução do algoritmo no município de Queimados 126
Tabela 23 – Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados na região de Queimados para estações de 1 W 132
Tabela 24 - Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados na região de Queimados para estações de 10 W 133
Tabela 25 - Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados na região de Queimados para estações de 100 W 133
Tabela 26 – Desempenho de cobertura do Algoritmo 5 no município de Queimados, todos os casos de estudo 134
Tabela 27 – Valores utilizados de r, Z e M para o cálculo da complexidade da busca por força bruta 136
Tabela 28 – Valores para $CompTotal$ de acordo com a quantidade de estações testadas na SFN 137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASI	*Asynchronous serial interface*
AWGN	*Additive white gaussian noise* (ruído gaussiano branco aditivo)
ATSC	*Advanced Television Systems Committee*
ATSC 3.0	*Advanced Television Systems Committee 3.0*
BPF	*Band Pass Filter* (Filtro passa baixa)
DVB-T	*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*
DVB-T2	*Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2*
EIRP	*Effective Isotropic Radiated Power* (Potência efetiva radiada isotropicamente)
Emax	Valor máximo de intensidade de campo elétrico
FEC	*Forward error correction*
FFT	*Fast Fourier transform* (transformada rápida de Fourier)
IG	Intervalo de guarda
ISDB-TB	*Integrated services digital broadcasting terrestrial Brazil*
ISDB-Tn	*Integrated services digital broadcasting terrestrial Next*
ITU-R	*Intenational Telecommunications Union Recommendation*
MIMO	*Multiple input multiple output* (múltiplas entradas múltiplas saídas)
MER	*Modulation error ratio* (taxa de erro de modulação)
MSE	*Mean square error* (erro médio quadrático)
NEC	*Nippon Electric Company*
NHK	*Nippon Hōsō Kyōkai – Japan Broadcasting Corporation*
OFDM	*Orthogonal frequency division multiplex* (multiplexação por divisão ortogonal de frequência)
QAM	*Quadrature amplitude modulation* (modulação de amplitude em quadratura)
QPSK	*Quadrature phase-shift keying* (modulação por deslocamento de fase em quadratura)
RI	Região de interesse
RF	Rádiofrequência
SFN	*Single Frequency network* (rede de frequência única)
SHV	*Super Hi-Vision*

SISO	*Single input single output* (entrada única saída única)
TV	Televisão
UHD	*Ultra High Definition* (ultra alta definição)
UHF	*Ultra High Frequency* (ultra alta frequência)
VA	Variável aleatória

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 19
1 RADIODIFUSÃO DE TV DIGITAL 23
1.1 ISDB-TB e ISDB-Tn 23
1.2 MIMO e SISO 26
1.3 Projeto de Cobertura de TV digital 28
1.4 Redes de Frequência Única 33
2 O MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P.1546 36
2.1 Equações de predição de intensidade de campo elétrico 38
3 CAMPANHA DE MEDIDAS 42
3.1 *Setup* de Transmissão 42
3.1.1 A Antena de Transmissão 44
3.2 Setup de Recepção 47
3.3 Dados Coletados 50
4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P. 1546 56
4.1 Função Objetivo 56
4.2 Método de Otimização do Gradiente Descendente 57
4.2.1 Histórico 57
4.2.2 O Método 57
4.2.3 Implementação 58
4.3 Método de Otimização de Newton-Raphson 59
4.3.1 Histórico 59
4.3.2 O Método 60
4.3.3 Implementação 61
5 RESULTADOS DAS OTIMIZAÇÕES DO MODELO DE PROPAGAÇÃO 63
5.1 Resultados com o Gradiente Descendente 63
5.1.1 Convergência 63
5.1.2 Resultados 65
5.1.3 Avaliação Cruzada 67
5.2 Método de Otimização de Newton-Raphson 68
5.2.1 Análise da Convergência 68
5.3 Comparativo entre os métodos 74

5.3.1 Validação Cruzada 75
6 POSICIONAMENTO DE ELEMENTOS IRRADIANTES PARA A COBERTURA DE UMA REGIÃO DE INTERESSE 77
6.1 O problema 77
6.2 Estratégica Heurística Proposta 81
6.2.1 Cobertura na RI 86
6.2.2 Elevação 89
6.2.3 Centroides fora da RI 91
6.2.4 PCob 96
6.2.5 Região de Busca 99
6.2.6 Constantes de Calibração 102
6.2.7 O Processo Iterativo 104
7 DESEMPENHO DO MÉTODO 108
7.1 Superfície de teste 108
7.1.1 Resultados 109
7.2 Caso realista 121
7.2.1 A região de interesse 121
7.2.2 Resultados 124
7.3 Complexidade do Algoritmo 135
7.3.1 Busca por força bruta 135
7.3.2 Busca proposta 137
8 CONCLUSÃO 141
REFERÊNCIAS 144

INTRODUÇÃO

Com o desligamento da televisão analógica no Brasil e a consequente liberação de faixas de frequência, radiodifusores passaram a se preocupar com a próxima geração de TV digital [1]. Espera-se que as tecnologias futuras sejam capazes de prover transmissão de alta capacidade de forma a satisfazer demandas de usuários com telas de resolução 4K ou 8K (ou UHD, *ultra high definition*) mantendo a robustez e a disponibilidade do atual padrão de televisão [2].

Existem diversas propostas e novos padrões para TV digital aberta. As principais propostas UHD são: o padrão DVB-T2 [3], já implementado na Europa, escalável e em fase de testes para a migração para UHD, o padrão ATSC 3.0 [4], que está em fase de publicação e o padrão ISDB-Tn que ainda está em desenvolvimento no Japão [5]. Todos esses novos padrões propõem canalização, modulação e codificação capazes de atingir as taxas necessárias para entregar conteúdo UHD [1].

O ISDB-Tn [5] é uma das alternativas nesse cenário sendo a evolução do padrão nacionalmente adotado para a radiodifusão de TV Digital, ISDB-TB [6], que propõe o uso de técnicas MIMO (*multiple imput multiple output*) com modulações em fase e quadratura de alta densidade. No processo de avaliação real e prática de tal sistema, montou-se um *setup* experimental na cidade do Rio de Janeiro em parceria com o organização NHK que propõe e testa essa nova geração do padrão ISDB. O sistema montado operou no canal UHF 30 (566 a 602 MHz). Com ele, realizaram-se medidas de forma a avaliar o desempenho da cobertura desse sistema MIMO em um ambiente urbano de relevo montanhoso. O conjunto de dados coletado permite avaliar diferentes aspectos desse sistema. Por exemplo, um deles é se existe ou não diferença entre os canais de RF, nas ondas propagantes simultaneamente, em polarizações horizontal e vertical.

A cidade do Rio de Janeiro é especialmente desafiadora nesse sentido, pois é um ambiente urbano que apresenta relevo montanhoso cercado por água. Os dados coletados são comparados com os preditos através do já clássico modelo de predição ITU-R P. 1546 [7], já que o mesmo foi desenvolvido a partir de resultados empíricos e não leva em consideração a polarização da onda propagante. Assim, é possível avaliar e melhorar seu desempenho no caso em questão.

Motivação

Há uma busca pelo novo padrão de transmissão de televisão a suceder o atual ISDB-TB. Nesse aspecto avaliou-se o padrão ISDB-Tn que, diferentemente das demais propostas, utiliza dupla polarização, ou seja, na mesma faixa de frequências se propagam duas ondas, cada uma polarizada perpendicularmente à outra. Atualmente, existem poucos estudos sobre propagação em dupla polarização na faixa de frequências de UHF.

No atual estágio de implementação e operação de sistemas de TV digital aberta, é necessário tanto explorar novas tecnologias (para a natural evolução e desenvolvimento industrial e mercadológico), como também para tornar as atuais práticas de projeto de cobertura mais confiáveis e otimizá-las. Os últimos aspectos se tornam cada vez mais importantes e complexos, devido à perspectiva de que o atual e os futuros padrões de televisão digital utilizem as chamadas redes SFN (*single frequency network*, ou rede de frequência única). No paradigma SFN, pretende-se utilizar múltiplos transmissores operando na mesma faixa de frequências. Assim, o posicionamento desses transmissores se torna bastante importante dado que as coberturas precisam ser complementares, de modo a atender da melhor maneira possível a região de interesse, que pode ser a área urbana de um município, por exemplo.

Objetivos

Este trabalho busca avaliar o desempenho da cobertura MIMO através de medidas de campo e do modelo de propagação ITU-R P.1546. A partir das medidas obtidas nos testes de campo, sintonizam-se os parâmetros do modelo ITU-R P.1546 utilizando os métodos de otimização do gradiente descendente e Newton-Raphson, para cada uma das polarizações, tanto separadamente como em conjunto. Assim, são obtidos parâmetros sintonizados por polarização para o modelo, que são mais assertivos nesse ambiente.

Outro problema correlato abordado nesta dissertação foi o posicionamento de transmissores em uma região. Propõe-se uma heurística de busca que utiliza informações do relevo para otimizar a cobertura de uma rede. Com isso, facilita-se o

projeto de tais redes, obtendo-se as posições dos transmissores que maximizam a fração coberta de uma região de interesse pré-definida.

Estrutura da dissertação

O presente capítulo apresenta a motivação deste trabalho e uma breve descrição do conteúdo do mesmo.

No Capítulo um, apresenta-se o padrão de TV digital ISDB-Tn. Diversas características são apresentadas e o padrão é comparado com o atual ISDB-T. Apresenta-se ainda um breve resumo de redes SFN do ponto de vista de projetos de redes de televisão.

No Capítulo dois, faz-se uma síntese da história e características do clássico modelo de propagação ITU-R P.1546: seus principais aspectos teóricos, principais parâmetros e fatores de correção. Discutem-se ainda as principais vantagens em utilizá-lo e os maiores problemas na sua aplicação.

No Capítulo três, são relatados a campanha de medidas feita durante os períodos de testes e demonstração - nos jogos olímpicos de 2016 na cidade do Rio de Janeiro - os *setups* de transmissão e recepção, os dados obtidos e o tratamento dos mesmos.

No Capítulo quatro, são descritos os métodos de otimização de gradiente descendente e de Newton-Raphson, utilizados posteriormente para sintonizar os parâmetros do modelo de propagação ITU-R P.1546.

No Capítulo cinco ,apresentam-se os resultados de otimização do modelo de propagação ITU-R P.1546 com os dois métodos de otimização. Isto é, apresentam-se os valores dos parâmetros do modelo otimizados por esses métodos e avaliam-se as melhorias no desempenho da predição obtidas a partir dos conjuntos de parâmetros retornados pelas otimizações.

No capítulo seis é apresentado o método de otimização de posicionamento de estações de uma rede SFN, com destaque para os critérios considerados no seu desenvolvimento.

No capítulo sete, apresentam-se alguns casos de referência para estudo e avaliação dos resultados da heurística utilizada e uma avaliação da complexidade envolvida requerida.

Finalmente, no capítulo oito, são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

Revisão Bibliográfica

Utilizam-se neste trabalho as equações presentes nas duas primeiras revisões da ITU-R P.1546 [8], pois a partir da terceira, a utilização de tabulações impossibilita a sintonia de parâmetros proposta.

Existem diversos artigos que tratam da sintonia de modelos de propagação; Paran e Noori otimizam o modelo de propagação ITU-R P.1546 utilizando algoritmos genéticos [9]; Yang e Shi utilizam os métodos do mínimos quadrados para otimizar o modelo de propagação Cost231-Hata [10] para redes 3G ; Sharma e Sae também otimizam o modelo Cost231-Hata para redes 4G [11].

Verificando-se a presença de trabalhos sobre otimização de estações compondo uma rede em mesma frequência, percebe-se que diversos trabalhos como o de Kiichen, Becker e Wiesbeck que otimiza os diagramas de radiação das antenas em uma dada SFN [12]; Tuban, Azman, Noordin e Ismail abordan o problema da localização de estações rádio-base de uma rede LTE de maneira simplista, otimizando o posicionamento das células com estações dada a distribuição de usuários numa região [13], Lanza, Gutiérrez et al que dentre diversos trabalhos otimiza os atrasos locais e a potência em cada transmissor em uma rede de televisão DVB [14]. Todos esses trabalhos utilizam alguma forma de abstração para lidar com o problema da SFN. Até a elaboração deste trabalho, não foram encontradas publicações que abordem o problema da localização de estações da maneira como abordada neste. Para tal, utiliza-se a base sobre heurística do livro do professor Stuart Russel [15].

1 RADIODIFUSÃO DE TV DIGITAL

1.1 ISDB-TB e ISDB-Tn

O padrão de TV Digital ISDB-Tn, em desenvolvimento pela companhia japonesa NHK, tem a missão de substituir o atual padrão japonês, o padrão ISDB-T [16]. O último foi adotado no Brasil (ISDB-TB) após sofrer leves modificações [17]. A principal característica do ISDB-Tn é a imersão do espectador no que é chamado de *Super Hi-Vision* (SHV) que utiliza resolução 8K (7680 colunas por 4320 linhas, 16 vezes superior à de telas HDTV) de imagem combinada a um sistema de áudio de até 22.2 canais. Essas características exigem uma tecnologia de transmissão capaz de atingir altas taxas (em bits/segundo). Ela precisa ser suficientemente eficiente para atingir a taxa de transmisão esperada, além de ser ao menos tão robusta quanto a do atual padrão de TV digital. Para isso, o ISDB-Tn propõe utilizar OFDM com constelações de alta densidade, podendo chegar a empregar 4096QAM (4096 símbolos podem ser distinguidos por combinações de fase e amplitude da mesma senóide). Além disso, enseja utilizar a tecnologia MIMO (*multiple input multiple output*) [18] em dupla polarização: são utilizadas ondas eletromagnéticas polarizadas horizontal e verticalmente no mesmo canal de RF para transmitir diferentes fluxos simultaneamente, aumentando ainda mais a capacidade do canal utilizado.

Na Tabela 1, é possível comparar as principais características do padrão nacional, ISDB-TB e da proposta ISDB-Tn, que é uma evolução do anterior.

Tabela 1 – Comparativo entre os padrões ISDB-TB e ISDB-Tn

Característica	ISDB-TB	ISDB-Tn
Banda	6 MHz (5,57 MHz útil)	6 MHz (5,57 MHz útil)
Quantidade de subportadoras	5616+1	Máximo de 22464+1
Espaçamento entre subportadoras	0,992 KHz	Mínimo de 0,248 KHz
Tamanho da FFT	8192 (8K)	32768 (32K)
Clock da FFT	8,137 MHz	8,137 MHz
Duração do Símbolo (µs)	1008	4032

Duração do intervalo de guarda (razão)	31 µs (1/32) até 504 µs (1/2)	126 µs (1/32) até 2ms (1/2)
Modulação	QPSK até 64QAM	64QAM até 4096QAM
Code rate	3/4	3/4
SISO/MIMO	SISO	MIMO

A maioria dos padrões atuais de TV digital utilizam OFDM (multiplexação por divisão ortogonal de frequências) como meio de transporte de seus símbolos pelo canal de comunicação, como o ATSC 3.0, o DVB-T e o DVB-T2, por exemplo. Entre as principais diferenças entre os padrões ISDB-TB e o ISDB-Tn está a alta densidade de subportadoras OFDM, com espaçamento entre subportadoras 4 vezes menor; isto é, o ISDB-Tn comprime 4 vezes mais subportadoras na mesma banda em que o ISDB-TB contém apenas uma subportadora, o que equivale a aumentar a quantidade de símbolos transportados no canal na mesma razão, conforme exemplificado na Figura 1.

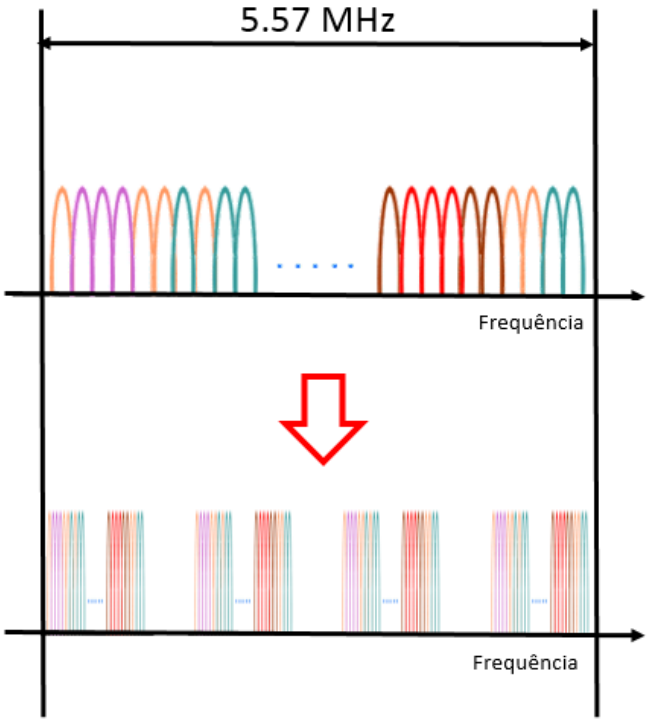

Figura 1 – Exemplificação da densidade das subportadoras do padrão ISDB-TB (superior) e ISDB-Tn (inferior).

Outra consequência relevante do aumento da quantidade de sub-portadoras é o prolongamento da duração temporal do símbolo. Já que o sinal modulado é 4 vezes mais denso, cada subportadora tem largura 4 vezes menor no domínio da frequência e, consequentemente, o símbolo modulado e o intervalo de guarda terão duração 4 vezes maior , como observado na Figura 2. Essa característica evidencia maior robustez do ISDB-Tn a multipercursos em comparação ao ISDB-TB [19].

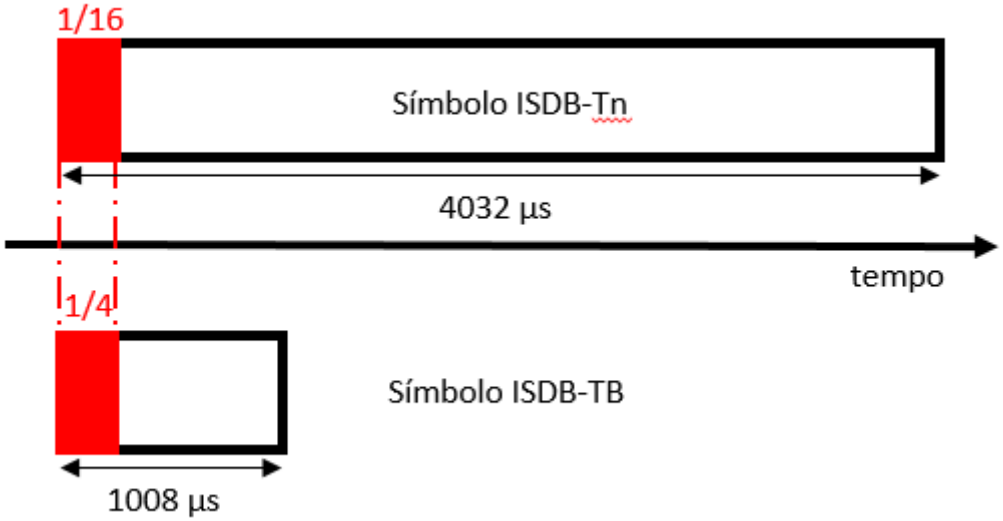

Figura 2 – Comparação entre os comprimentos temporais dos símbolos do padrão ISDB-TB e ISDB-Tn.

Outra característica do padrão ISDB-Tn que é utilizada para permitir a transmissão em taxas de bits maiores é a utilização de modulações de maior ordem. No atual padrão nacional pode-se utilizar modulações em fase e quadratura desde o QPSK (*quadrature phase shift keying*) até o 64QAM (quadrature amplitude modulation com 64 possíveis símbolos); usualmente utiliza-se a modulação QPSK para a transmissão para dispositivos móveis devido a sua robustez e o 64QAM ou 16QAM para transmissão para recepção fixa. Já no padrão ISDB-Tn, pode-se utilizar modulações QAM mais complexas (até a constelação 4096QAM com 4096 símbolos possíveis). A Equação (1) apresenta a relação entre quantidade de símbolos na constelação m e a quantidade de bits comportados num símbolo R_s

$$R_s(m) = log_2(m). \quad (1)$$

Dela obtemos o resultado de 6 bits por símbolo para o 64QAM ($m = 64$) e 12 bits por símbolo para 4096QAM ($m = 4096$), o dobro. Na Figura 3 ilustra-se graficamente os efeitos do aumento da densidade de símbolos. Esse aumento de taxa implica também em aumento da taxa de erros de bits para recepção para uma mesma razão sinal-ruído [20].

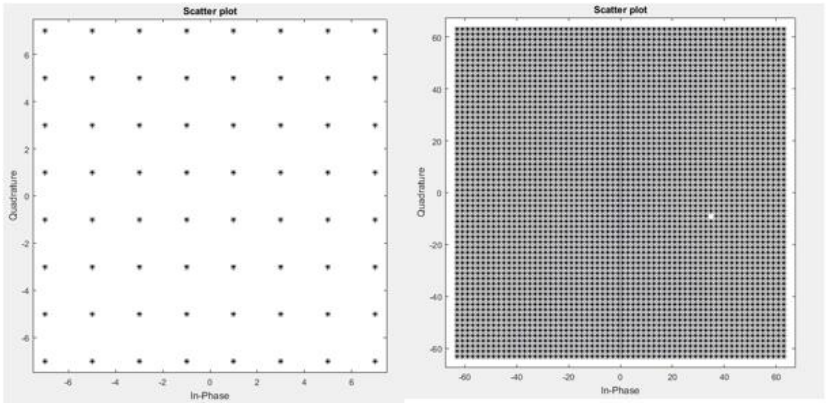

Figura 3 – Constelações de símbolos modulados em 64QAM (esquerda) e 4096QAM (direita)

1.2 MIMO e SISO

O ISDB-Tn emprega as técnicas do ISDB-TB, porém com maior complexidade. Entretanto, pode-se dizer que o principal diferencial entre o padrão ISDB-Tn e os demais é a adoção do conceito MIMO para ter dois canais de dados (dois fluxos simultâneos) na mesma banda de 6 MHz (largura do canal de TV brasileiro).

Pode-se dar diferentes usos para sistemas de múltiplas antenas, como por exemplo o ganho de diversidade aumentando a confiabilidade de enlaces sem fio para conferir ganhos direcionais com o chamado *beamforming* [21]. Outro uso é através de exploração do desvanecimento do ambiente que, ao utilizar múltiplas antenas transmissoras e receptoras separam-se os canais espacialmente, no que é chamado de multiplexação espacial. Num MIMO 2x2, os dados são separados em

dois fluxos, h_{11} e h_{22}, como na Figura 4, e são transmitidos separadamente pelas antenas 1 e 2 aumentando assim a capacidade do canal.

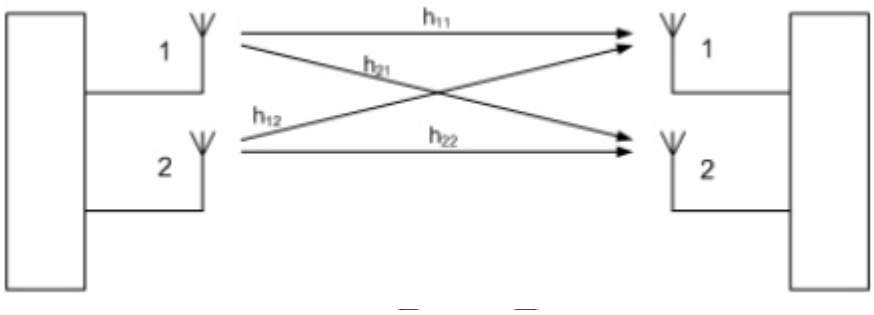

Figura 4 – Configuração MIMO com antenas 2x2.

Como transmite-se pelo mesmo canal, cada mensagem poderá influenciar as demais mutuamente, criando assim um efeito tipo *cross-talk*; na Figura 4, h_{12} e h_{21} representam as respostas ao impulso cruzadas num cenário MIMO (2x2) que poderão gerar sinais interferentes [18]. Se a matriz $\boldsymbol{H}$ da Equação (2) é conhecida, ou seja, a relação entre mensagens e o *cross-talk*, seus componentes podem ser estimados no receptor.

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Se na transmissão for incluída alguma sinalização que também seja conhecida no receptor, este poderá realizar a estimação de canal e mitigar consideravelmente os componentes *cross* [18].

No caso do ISDB-Tn os canais são diferenciados pela polarização das ondas eletromagnéticas transmitidas. Cada fluxo de dados é transmitido utilizando uma polarização linear, um é transmitido com polarização horizontal e o outro vertical, garantindo a separação na recepção, conforme ilustrado na Figura 5 [22].

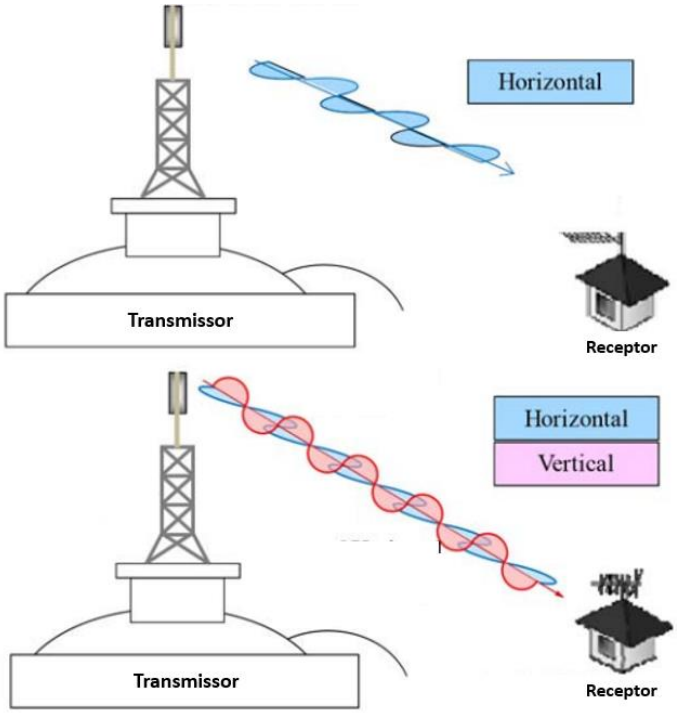

Figura 5 – Na parte superior, ondas se propagando na polarização horizontal e na inferior ondas se propagando na polarização horizontal e vertical simultaneamente.

Em projetos de cobertura de TV digital é usualmente utilizada a polarização horizontal para regiões não predominantemente urbanas ou a elíptica (onda em parte polarizada verticalmente e em parte horizontalmente) para grandes metrópoles. A última facilita a recepção tanto fixa quanto móvel, tanto em pequenas cidades e grandes metrópoles, onde existe uma maior quantidade de usuários em configuração *indoor* [23].

A utilização de MIMO, apesar do ganho na eficiência espectral, aumenta bastante a complexidade do sistema, pois como cada canal de transmissão utiliza a mesma faixa de frequências, pequenas variações nas polarizações das ondas eletromagnéticas podem causar interferências de uma sobre a outra.

Em testes no Brasil e Japão foram obtidas taxas de transmissão de até 91 Mb/s utilizando MIMO 2x2 e 4096QAM com ISDB-Tn, possibilitando carregar vídeos de resolução 8k e 22.2 canais de áudio [1].

1.3 Projeto de Cobertura de TV digital

O projeto de cobertura de TV digital leva em consideração 2 principais características: máxima potência efetivamente radiada ($EIRP_{max}$), dada pelo produto

da potência transmitida P_{in} com a perda dos cabos L e o ganho da antena transmissora G_i (Equação (3)).

$$EIRP_{max} = G_i \cdot L \cdot P_{in} \quad (3)$$

Geralmente, inicia-se um projeto após a seleção de um local em que será instalado o transmissor e o conjunto irradiante (cabos, linhas e antenas). Após isso, especificam-se os diagramas de irradiação vertical e horizontal da antena transmissora. Eles dependem da disposição geográfica do ponto de transmissão e da área de atendimento e determinam a fração da $EIRP_{max}$ que será irradiada num determinado azimute, que é a medida entre a projeção de um determinado ponto e o norte geográfico. A Figura 6 ilustra um exemplo para um ponto localizado no município de Rio Formoso, no estado de Pernambuco, considerando a especificação do diagrama de radiação horizontal.

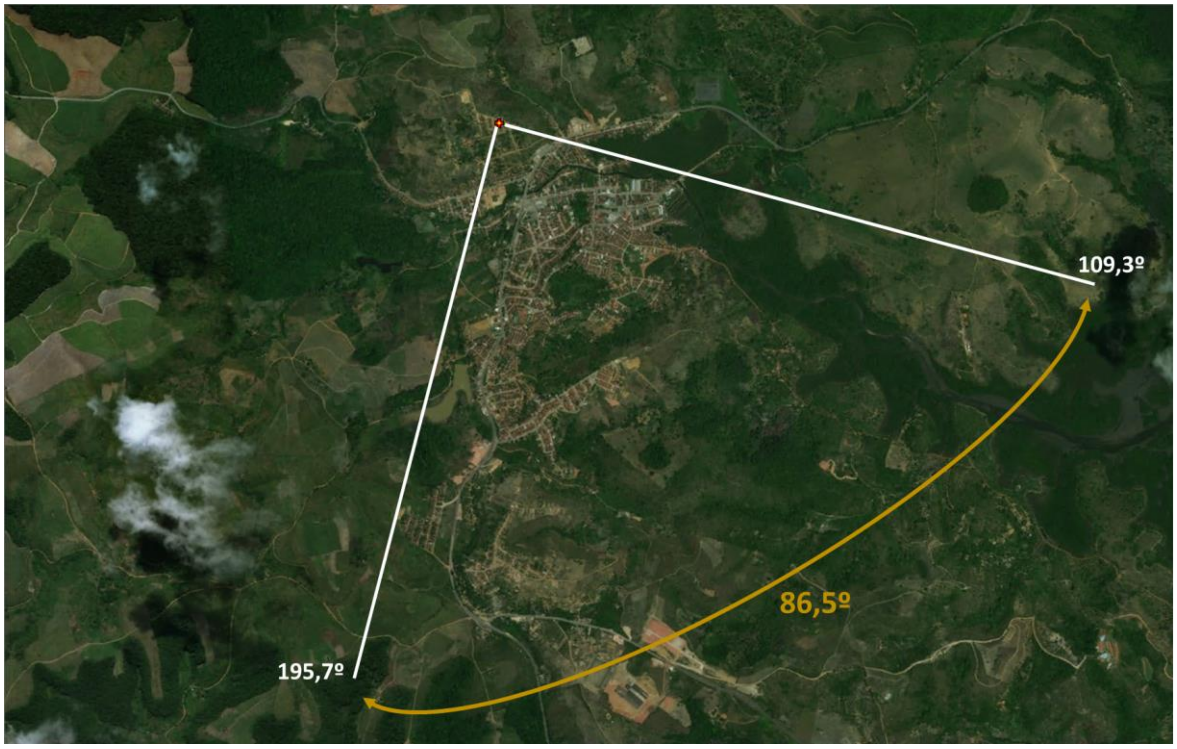

Figura 6 – Exemplo de abertura angular necessária para o atendimento de um pequeno município.

Após a seleção do diagrama horizontal, feito medindo os azimutes dos extremos da área a ser coberta e o centro do ângulo formado pelos mesmos, é necessário fazer a mesma avaliação para o diagrama de radiação vertical. O ângulo de elevação formado no eixo vertical entre transmissor e receptor irá influenciar a especificação desse diagrama. A Figura 7 mostra a distribuição desse ângulo na mesma região de interesse.

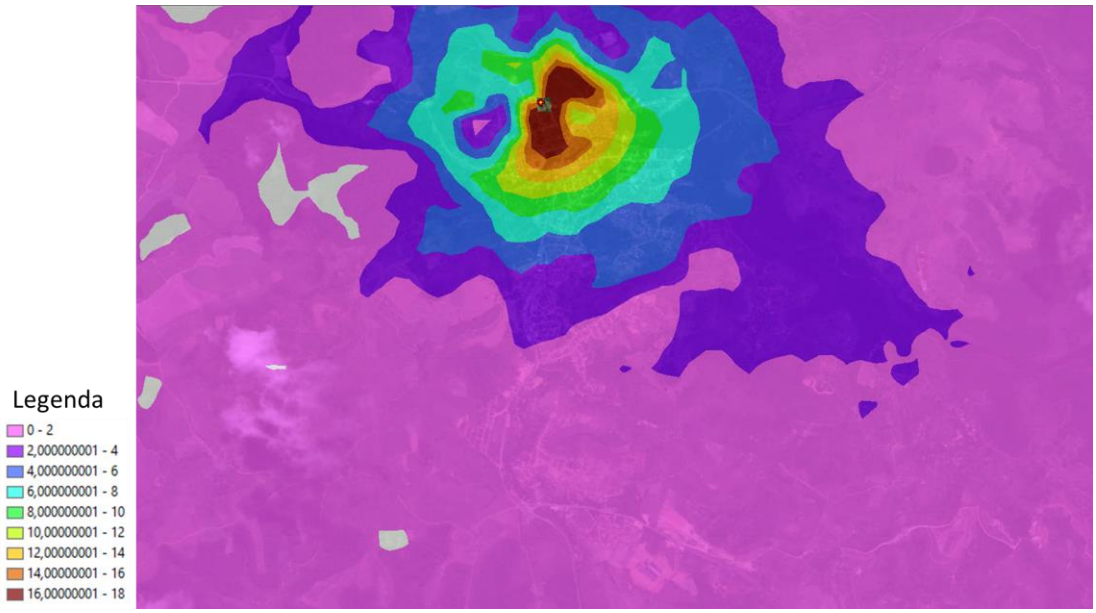

Figura 7 – Ângulo de elevação entre transmissor e receptor.

Determinados o ângulo de abertura e a predominância do ângulo de elevação, pode-se escolher no mercado uma antena ou arranjo de antenas para atender a esses critérios. A exemplo hipotético, foram reunidas as informações necessárias para especificar uma antena e seu posicionamento. A Figura 8 ilustra uma antena do tipo *slot* que atende a critérios da Tabela 2; o diagrama horizontal é escolhido com os dados do ângulo de abertura e o vertical com os de elevação.

Tabela 2 – Características do diagrama da antena de transmissão estimados com as informações obtidas através das análises da Figura 6 e Figura 7

Diagrama horizontal	
Abertura	~86,5°
Apontamento	152,5°
Diagrama vertical	
Abertura	6°
Inclinação	3°

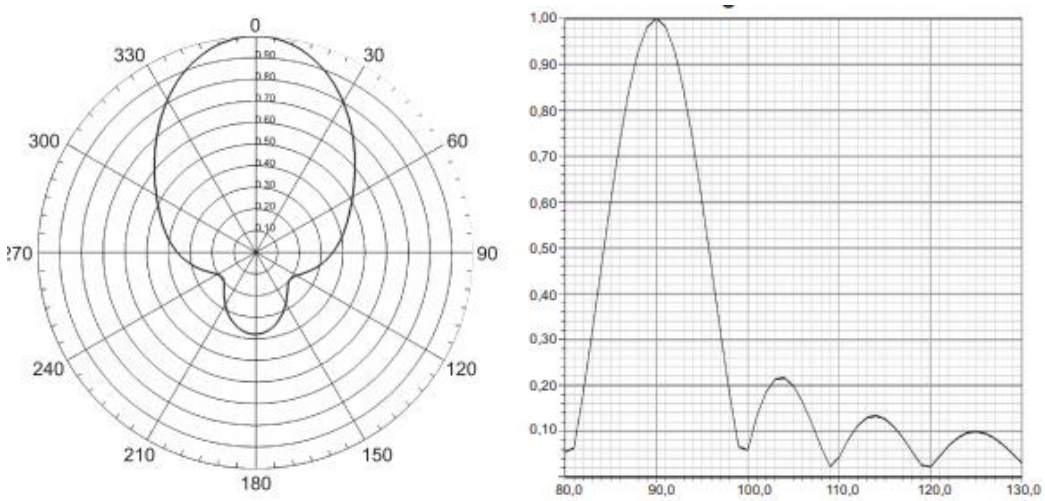

Figura 8 – Diagrama de uma antena tipo *slot* de 6 fendas que atende os requisitos estimados na Tabela 2 [24].

Com a escolha da antena via diagramas de radiação, consulta-se o ganho dessa antena e define-se a potência mínima necessária para o atendimento da região de interesse (RI) - região na qual se deseja prover o serviço de TV digital aberta, área que se deseja cobrir para recepção. Ela é escolhida a partir de simulações de cobertura com diversas $EIRP_{max}$ com a ajuda de um modelo de propagação. Assim, com a mancha de atendimento escolhida, para uma determinada $EIRP_{max}$ é calculado, P_{min} o mínimo valor de P_{in} necessário com a Equação (4).

$$P_{in} = \frac{EIRP_{max}}{G_i \cdot L} \geq P_{min} \tag{4}$$

Para concluirmos o exemplo da estação estudada, estipulou-se o valor mínimo de campo elétrico de 58 dBμV/m e, com esse critério, gerou-se uma mancha de atendimento com a potência de transmissão EIRP de 100 W e com a antena escolhida em [24] vê-se que a mesma atende satisfatoriamente a região da cidade de Rio Formoso.

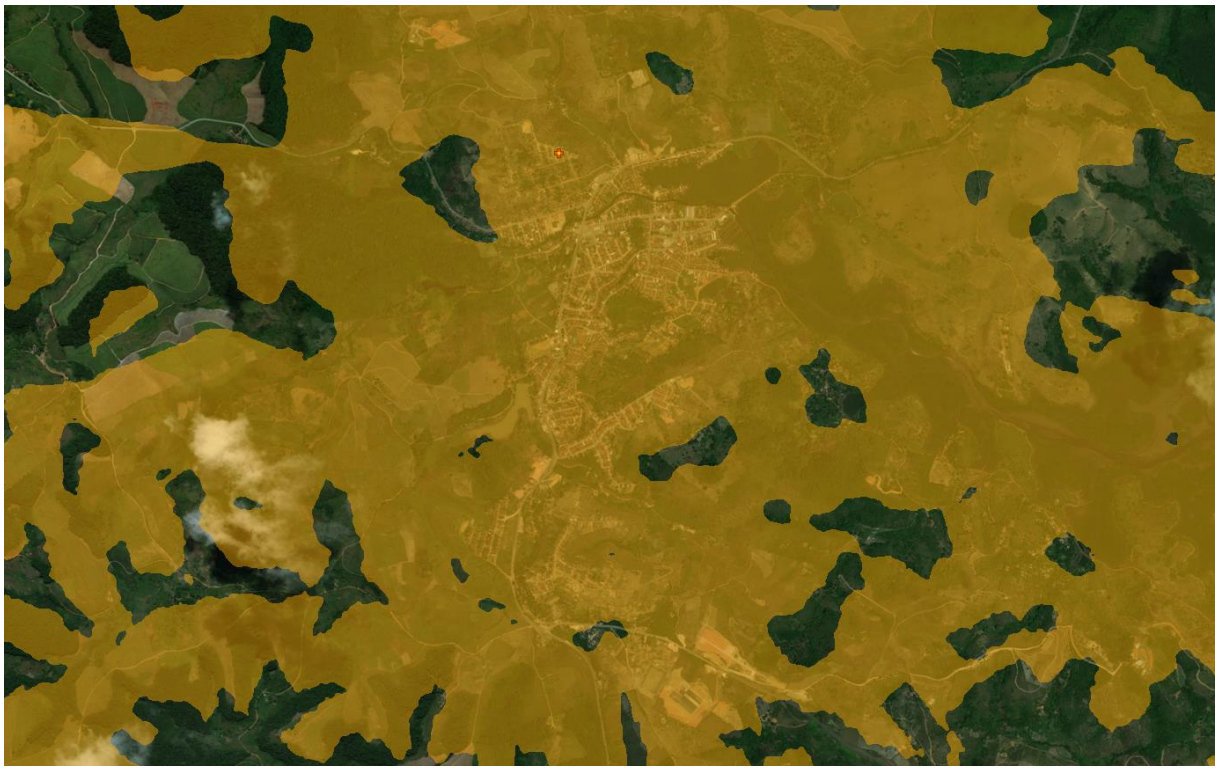

Figura 9 – Mancha de cobertura para um limiar de 58 dBμV/m e potência EIRP de transmissão de 100 W.

Assim, aplica-se a Equação (4) resultando em um valor mínimo de potência de transmissor P_{min} de 4,5 W calculado com os parâmetros hipotéticos da Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros hipotéticos utilizados e P_{in} calculado utilizando a Equação (4)

$EIRP$	100 W
G_i	27,2
L (%)	0,85
P_{in}	4,5 W

Com esse raciocínio, se estabelece de maneira simples uma relação entre a localização geográfica da estação com o diagrama de radiação da antena escolhida e, realizando simulações de cobertura em função do ponto e da antena escolhidos, irá sugerir um ganho que em conjunto com a potência de entrada atinge a EIRP mínima para a cobertura da RI.

1.4 Redes de Frequência Única

Uma rede de frequência única (SFN – *Single Frequency Network*) é formada por um conjunto de transmissores operando numa mesma frequência para cobrir uma determinada região geográfica com o mesmo canal de TV. Os transmissores operam na mesma banda de frequência e em sincronismo em tempo de símbolo, entregando aos usuários o mesmo conteúdo. A utilização desse tipo de rede é uma grande vantagem dos atuais padrões de TV digital, pois possibilita o atendimento de grandes regiões utilizando um único canal. A Figura 10 ilustra a cobertura do município do Rio de Janeiro atendido por diversas estações em SFN; o uso desse tipo de rede economiza banda nas faixas de frequência de VHF ou UHF. Outra vantagem é, para usuários de TV móvel, a continuidade do serviço ao longo de grandes trajetos, já que não se torna necessária a ressintonização do mesmo.

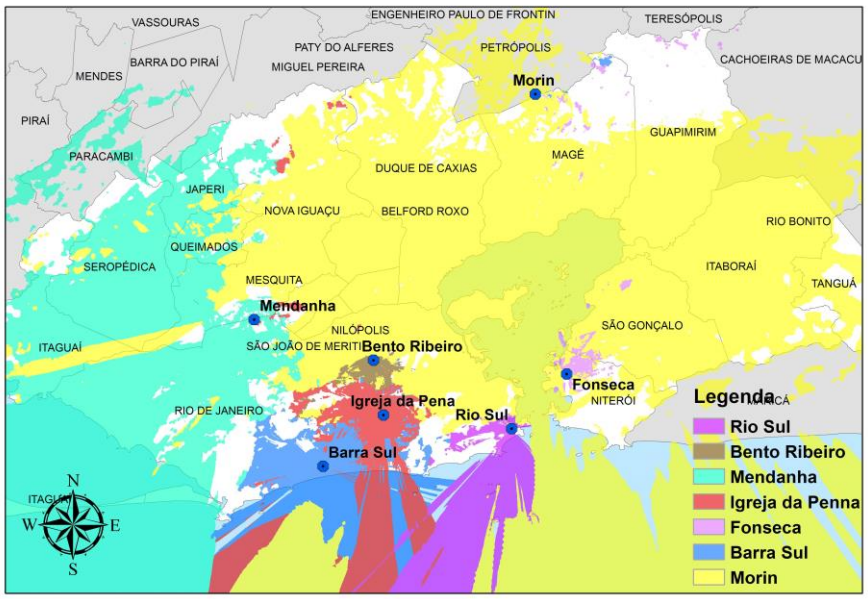

Figura 10 –Sobreposição de coberturas para o atendimento do município do Rio de Janeiro.

Segundo [25] a otimização de redes SFN que utilizam OFDM pode ensejar dois aspectos: 1) a potência de transmissão efetiva (EIRP) por estação e 2) o atraso relativo entre sinais provenientes de transmissores na recepção. Isso pode ser efetuado de diversas maneiras: pode-se regular a potência de transmissão e o ganho das antenas para maximizar a área de atendimento enquanto se mantém atrasos estáticos ou garantir a mínima razão sinal ruído (pré-definida) enquanto o problema dos atrasos temporais relativos é mantido em tamanhos máximos de intervalo [14] [26]. A utilização de OFDM no padrão ISDB torna o sistema robusto à multipercursos [27], pois ao transmitir dados usando diversas subportadoras de taxa reduzida, faz com que a seletividade na dispersão no tempo seja reduzida, além do intervalo de guarda (IG) permitir mitigar os efeitos da interferência entre símbolos subsequentes [28].

Como todas as antenas radiam o mesmo sinal, se os sinais de i antenas chegam em um receptor estático. Assumindo que a resposta do canal que chega do i-ésimo transmissor é modelada por

$$h_i(t) = \alpha_i \cdot \delta(t - \tau_i), \tag{5}$$

isto é, o sinal recebido i-ésimo transmissor,

$$x_i(t) = h_i(t) * s(t), \tag{6}$$

é uma cópia do sinal transmitido com atenuação α_i e atraso relativo τ_i. O sinal recebido é

$$x(t) = \sum_{i=1}^{I} h_i(t) * s(t) \tag{7}$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^{I} \alpha_i \cdot s(t - \tau_i). \tag{8}$$

A técnica OFDM usa N subportadoras em paralelo para transmitir o sinal pelo canal, o que alarga o tempo do símbolo N vezes se comparado ao tempo de um

símbolo em um sistema monoportadora [29]. Esse alargamento temporal ajuda a mitigar a interferência intersimbólica com a utilização do intervalo de guarda, que descarta uma fração copiada do símbolo para que não ocorra a sobreposição de símbolos. A Figura 11 mostra uma exemplo da utilização de IG para mitigar a interferência intersimbólica.

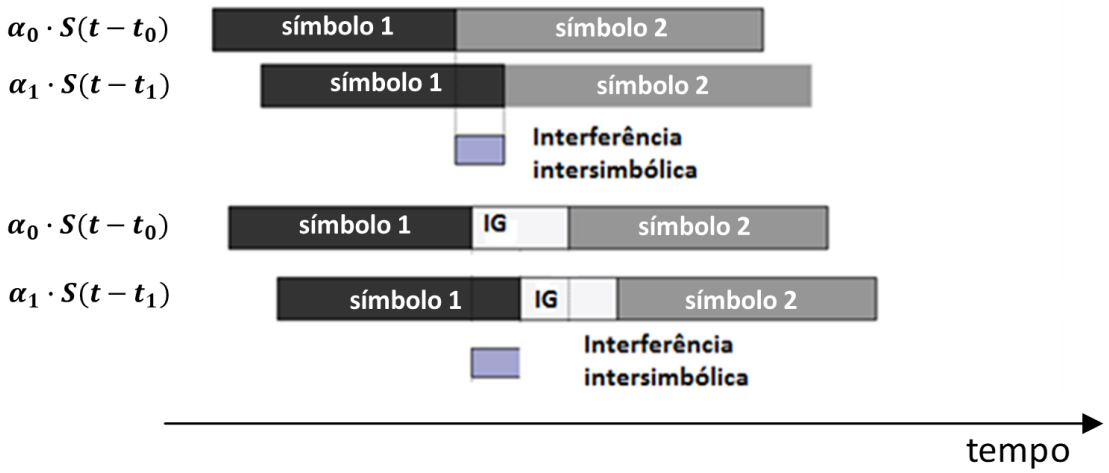

Figura 11 – Utilização do IG para a mitigação da interferência intersimbólica.

SFN são bastante vantajosas, não só pelo melhor aproveitamento do espectro mas por permitirem garantir a continuidade de serviços em extensas regiões. Porém, projetar uma rede SFN pode ser um trabalho bastante complexo, pois envolve muitos fatores. Sendo assim, este trabalho visa facilitar esse tipo de projeto, sintonizando os parâmetros do modelo de propagação utilizado para melhor atender à região em cobertura, como também otimizar a localização das estações transmissoras que formarão essa rede.

2 O MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P.1546

O modelo de propagação ITU-R P.1546, publicado em 2001 [8], veio em substituição ao ITU-R P.370 [30]. Elaborado a partir de medidas de campo realizadas nos Estados Unidos e Europa, o ITU-R P.1546 é um dos mais importantes modelos de propagação na faixa de VHF e UHF. Ele é utilizado no Brasil pela Anatel para determinar os contornos geográficos de canais de telecomunicações e evitar interferências em longa distância entre canais adjacentes [31].

A partir de dados coletados em campanhas de medidas, foram calculadas curvas (Figura 12) que representam a intensidade de campo elétrico em função da distância para uma EIRP de 1 kW para diversas alturas da antena de transmissão h_1. No texto da ITU-R P.1546 são apresentadas apenas as curvas para as frequências de 100, 600 e 2000 MHz, que não são específicas por polarização. O modelo ITU-R P.1546 apresenta diferentes curvas em função da porcentagem de tempo (1, 10 e 50%) em que o campo eletromagnético deve ser igual ou superior ao valor do eixo y. Essas curvas tentam, de alguma forma, acomodar a variabilidade da intensidade do campo elétrico [32]. Além disso, algumas curvas dependem do tipo de terreno; há curvas para terra, mar e terreno misto. A Figura 12 apresenta as curvas para a porcentagem de tempo de 50%, propagação sobre terra na frequência de 100 MHz [7].

É necessária a interpolação ou extrapolação dos resultados de intensidade de campo elétrico em dBμV/m para obtenção dos resultados para outra frequência, isso é feito através de

$$E = E_{inf} + \left(E_{sup} - E_{inf}\right) \log\left(\frac{f}{f_{inf}}\right) / \log\left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}}\right), \tag{9}$$

onde E_{inf} e f_{inf} são, respectivamente, os valores de campo elétrico e frequência encontrados na curva da norma na frequência inferior à frequência f desejada. As variáveis E_{sup} e f_{sup} correspondem aos valores de campo elétrico e frequência da curva de frequência superior à f desejada.

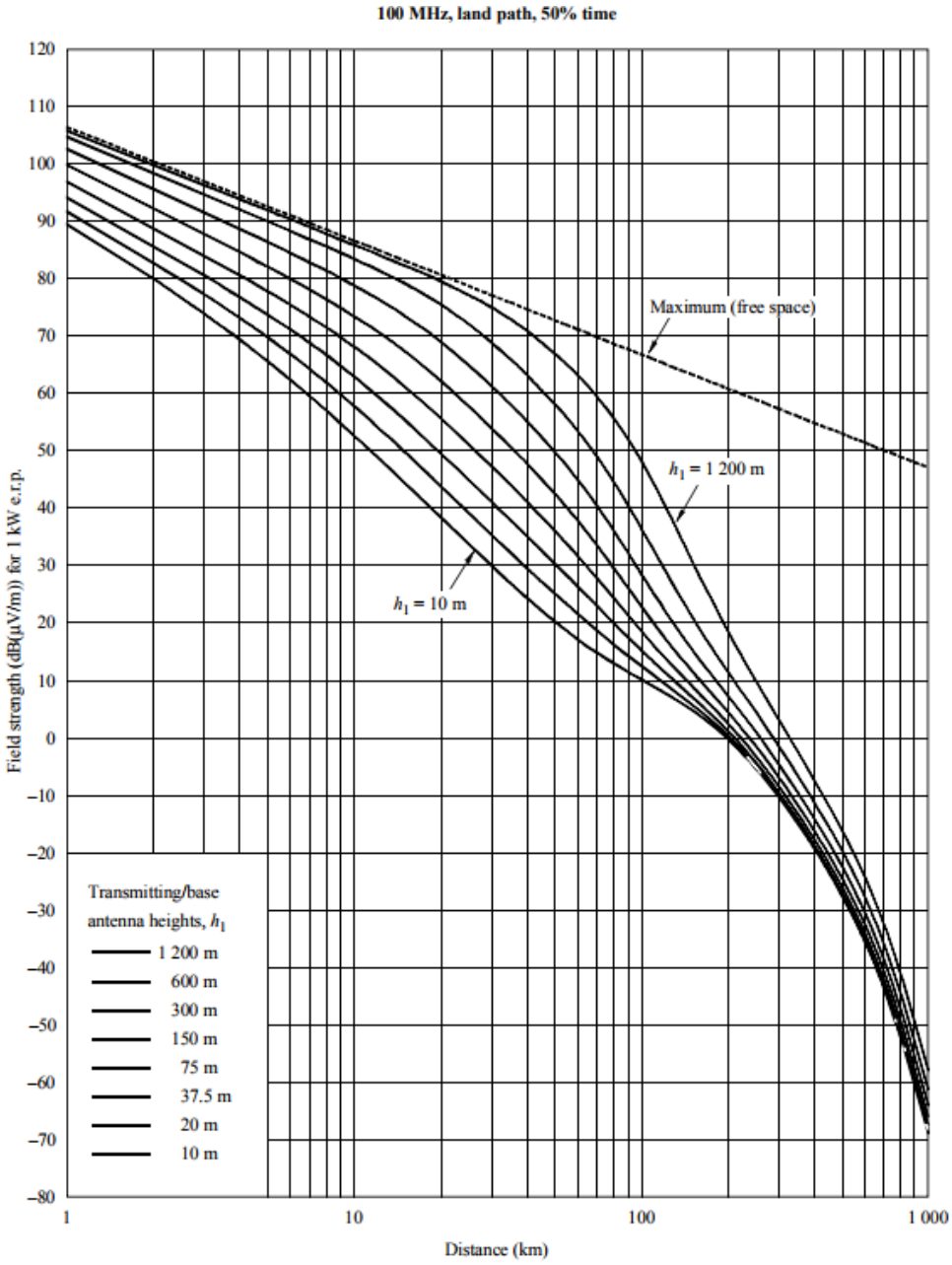

Figura 12 – Curva de intensidade de campo eletromagnético dada a distância na frequência de 100 MHz [7].

Além disso, é necessário ajustar o valor do campo elétrico dada a porcentagem das localidades q % em que se deseja que o valor de campo elétrico E seja superado [7]. Tal ajuste é obtido através de

$$E(q) = E_L(median) + Q_i\left(\frac{q}{100}\right)\sigma_L, \tag{10}$$

onde o $E_L(median)$ é a mediana, σ_L é o desvio padrão da intensidade do campo eletromagnético em um dada área e $Q_i()$ é a distribuição normal cumulativa complementar inversa em função da probabilidade [33]. A variável *q* pode assumir valores entre 1 e 99, que é o valor da porcentagem das localidades em que o campo elétrico excede o valor de E_L calculado para uma determinada área quadrada (uma célula da superfície de relevo) [7].

A altura da antena transmissora h_1, utilizada na Equação (12), é usada para determinar k, utilizada na Equação (13), através de um cálculo que depende da variável d, que é a distância entre transmissor e receptor: 1) para $d \leq$15 km, ela é dada pela diferença entre a altura da antena transmissora e a média da altura entre 0,2*d* e *d* km do percurso; 2) para $d >$15 km é a diferença entre a altura da antena transmissora e a média das alturas no percurso delimitado de 3 a 15 km entre antena transmissora e antena receptora.

2.1 Equações de predição de intensidade de campo elétrico

A ITU-R P.1546, nas revisões 0 e 1 do documento, emprega um conjunto de 14 equações (equações (11) a (24)) que consideram 21 parâmetros (a_0 a a_3, b_0 a b_7, c_0 a c_5 e d_0 e d_1), que variam com a frequência e a porcentagem do tempo no qual o valor do campo elétrico é igual ou superior ao da curva. Foram utilizadas essas revisões para o cálculo da curva, pois a supressão das equações por tabulações impossibilitam as otimizações propostas. Assim, para determinar a intensidade do campo elétrico E_c em um determinado ponto procede-se a

$$l_d = log_{10}(d) \tag{11}$$

$$k = \frac{log_{10}\left(\frac{h_1}{9.375}\right)}{log_{10}2} \tag{12}$$

$$E_1 = (a_0k^2 + a_1k + a_2)l_d + (0.1995k^2 + 1.8671k + a_3) \tag{13}$$

$$E_{ref1} = b_0 \cdot \left[\exp\left(-b_4 10^{ld^{b_5}}\right) - 1\right] + b_1 \cdot \exp\left[-\left(\frac{l_d - b_2}{b_3}\right)^2\right] \tag{14}$$

$$E_{ref2} = -b_6 \cdot l_d + b_7 \tag{15}$$

$$E_{ref} = E_{ref1} + E_{ref2} \tag{16}$$

$$E_{off} = c_5 \cdot k^{c_6} + \frac{c_0}{2} \cdot k \left\{ 1 - \tanh \left[c_1 \cdot \left(l_d - \left(c_2 + \frac{{c_3}^k}{c_4} \right) \right) \right] \right\} \tag{17}$$

$$E_2 = E_{ref} + E_{off} \tag{18}$$

$$p_b = d_0 + d_1 \cdot \sqrt{k} \tag{19}$$

$$E_u = \min(E_1, E_2) - p_b \cdot log_{10} \left(1 + 10^{-\frac{|E_1 - E_2|}{p_b}} \right) \tag{20}$$

$$E_{fs} = 106.9 - 20 l_d \tag{21}$$

$$E_b = \min(E_u, E_{f_s}) - 8 log_{10} \left(1 + 10^{-\frac{|E_u - E_{fs}|}{8}} \right) \tag{22}$$

$$Correções = C_{E.R.P} + C_{h_2} + C_{urban} + C_{t.c.a} + C_{h1<0} \tag{23}$$

$$E_c = E_b + Correções \tag{24}$$

Nas Equações (11) – (24), *d* é a distância em quilômetros entre transmissor e ponto de recepção, h_1 é a altura da antena transmissora. E_{fs} é a intensidade do campo elétrico dada a atenuação do espaço livre, E_b é a intensidade de campo elétrico calculada desconsiderando as correções para um transmissor com potência EIRP de 1 kW. A esse valor, aplicam-se as correções: C_{EIRP}, é utilizada para corrigir os cálculos para potências EIRP diferentes de 1 kW, C_{h_2} corrige a altura da antena receptora para valores diferentes dos de referência, C_{urban} considera distâncias curtas em ambiente urbano, $C_{t.c.a}$, refere-se à condição de "*terrain clearence*" e

$C_{h1<0}$, para valores negativos de h_1. Todas essas correções e seus respectivos cálculos são detalhados em [7].

A ITU-R P.1546 é muito utilizada como ferramenta para cálculo de interferência entre canais e na determinação dos contornos efetivos de cobertura na faixa de VHF e UHF [31] e é uma ferramenta de projeto de televisão digital importante no Brasil. Atualmente existem ferramentas mais modernas para a modelagem de cobertura como a ITU-R P.1812 [34] que utiliza modelos de difração e possui distinção de polarização, mas, não possui equações que possam ser otimizadas pelos métodos utilizados no Capítulo 4. A recomendação ITU-R P.1546 é utilizada para regulação dos canais em todo o território nacional assim, as melhorias e adequações da mesma para o território nacional são um dos objetivos deste trabalho.

As medidas de campo documentadas no Capítulo 3 foram realizadas no canal 30 de televisão (frequências de 566 a 572 MHz). Para esse canal, podemos obter as curvas de referências mostradas na Figura 13, calculadas na frequência central de 569 MHz. Ela foi gerada a partir da interpolação das curvas encontradas na ITU-R P.1546 nas frequências de 100 e 600 MHz e para a condição de 50% do tempo. No Capítulo 5 os dados empíricos serão comparados com o modelo de forma a ajustar seus parâmetros.

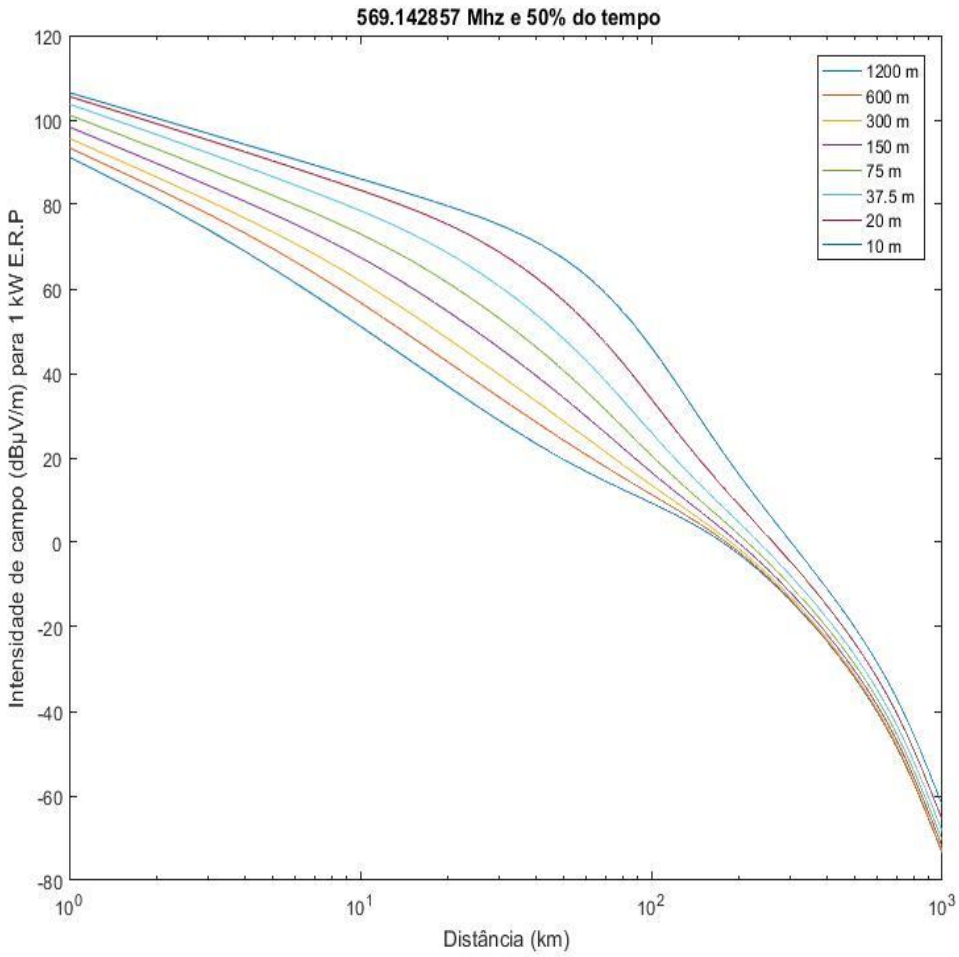

Figura 13 – Curva de intensidade de campo eletromagnético pela distância na frequência de 569 MHz interpolada utilizando a Equação (9).

Com esse modelo de predição é possível prever os valores de campo elétrico ponto-a-ponto de forma a obter um modelo ponto-multiponto para uma determinada região. Iremos validar a precisão desse modelo através da campanha de medidas realizada.

3 CAMPANHA DE MEDIDAS

No período de julho a agosto de 2016 foi instalado no Morro do Sumaré, na cidade do Rio de janeiro, um sistema de transmissão de sinais ISDB-Tn para uma demonstração-teste para os Jogos Olímpicos de 2016 [1]. Durante esse período foram realizadas medidas pela cidade para avaliar o desempenho do padrão proposto ISDB-Tn em uma região urbana densa como a do Rio de Janeiro [35].

3.1 *Setup* de Transmissão

O *setup* de transmissão [22] foi concebido a partir da modificação de um transmissor padrão ISDB-TB. O diagrama apresentado na Figura 14 mostra o arranjo.

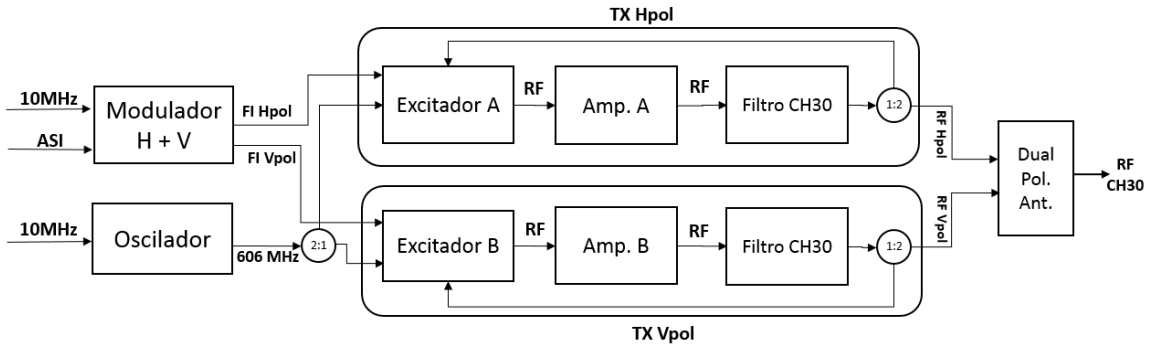

Figura 14 – Setup de transmissão de sinais padrão ISDB-Tn utilizado no período de testes.

Foram utilizados dois conjuntos de excitadores, amplificadores originais de um transmissor ISDB-Tb NEC modelo DTVM-21A e um oscilador para gerar a portadora que alimenta os excitadores de forma a alterar a frequência central do sinal gerado por eles para a faixa do canal 30 (566 MHz ~ 572 MHz). O sinal é modulado usando um modulador experimental fornecido pela empresa NEC e pela NHK, este recebe um fluxo no padrão ASI e o acomoda em duas sequências de

símbolos 4096QAM onde cada uma alimenta uma cadeia de transmissão. Todos os equipamentos estão presentes na Figura 15.

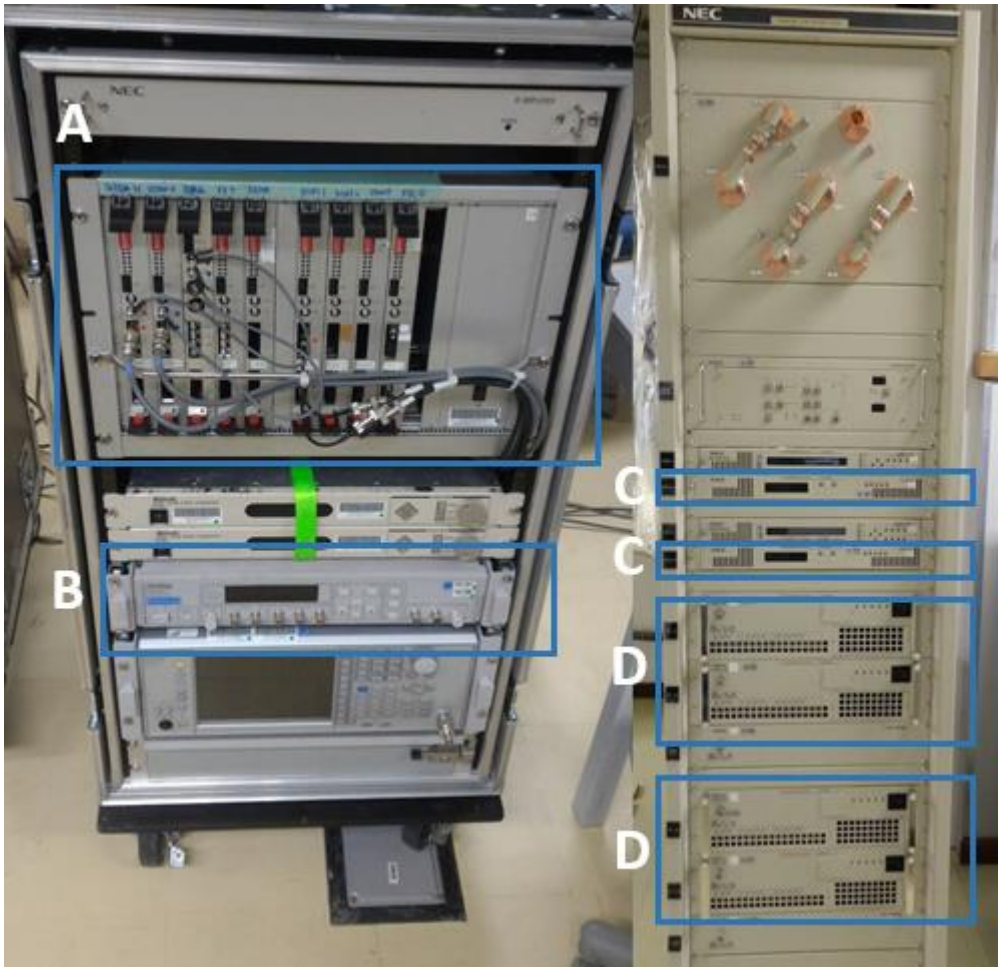

Figura 15 – Equipamentos utilizados para transmissão do sinal ISDB-Tn. A – Modulador, B – Excitador, C – Excitadores, D - Amplificadores.

Cada um dos sinais H e V gerará separadamente os sinais a serem transmitidos nas polarizações horizontal ou vertical, obtidas usando diferentes elementos irradiantes na "antena" de transmissão. Os sinais descritos na Tabela 4 provêm a transmissão de vídeo com resolução 8K pela cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 4 – Características de Transmissão

Banda do canal	6 MHz
FFT	32 K
Intervalo de guarda	1/32
Modulação	4096 QAM

FEC	3/4
Taxa de transmissão	91,8 Mbps

3.1.1 A Antena de Transmissão

Para a transmissão do fluxo MIMO em dupla polarização foi utilizada uma antena do tipo painel de dupla polarização do fabricante Denki Kogyo (Figura 16) alimentada por duas linhas de transmissão, uma para cada polarização [22] [5].

Essa antena foi instalada na torre da TV Globo localizada no morro do Sumaré com apontamento (azimute e elevação) para o Museu do Amanhã, onde ocorreu a demonstração da tecnologia ISDB-Tn [1]. Todas as principais características dos sistemas de irradiação são listadas na Tabela 5. Nela se encontram os principais parâmetros utilizados para a simulação de cobertura teórica.

Figura 16 – Antena de transmissão utilizada na demonstração.

Tabela 5 – Características do Sistema de Transmissão

Frequência central	569,142857 MHz
Banda	5,57 MHz
Pot. de transmissão por polarização	100 W
Ganho da antena de transmissão	12,1 dBd
Perda nos cabos e conexões	2,3 dB
Altura do centro de fase da antena	835 m

Essa antena emite ondas eletromagnéticas individuais polarizadas linearmente horizontalmente e verticalmente, permitindo assim criar os fluxos MIMO

na mesma banda. As Figura 17 e Figura 18 mostram os diagramas de irradiação da antena nas polarizações horizontal e vertical, respectivamente.

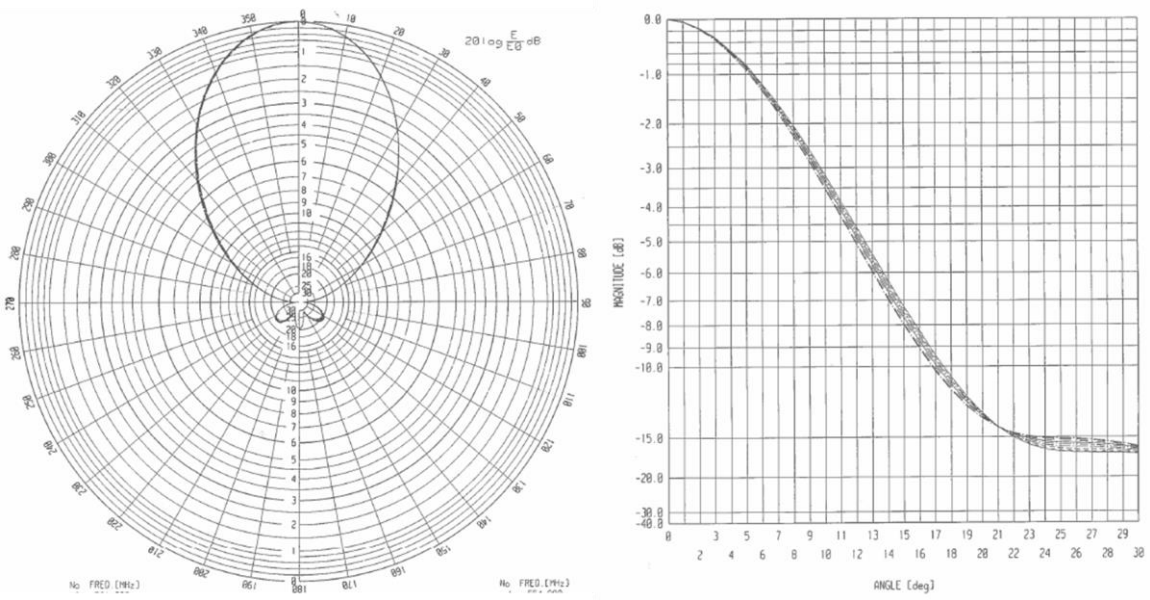

Figura 17 – Cortes do diagrama horizontal e vertical da antena de transmissão polarizada horizontalmente.

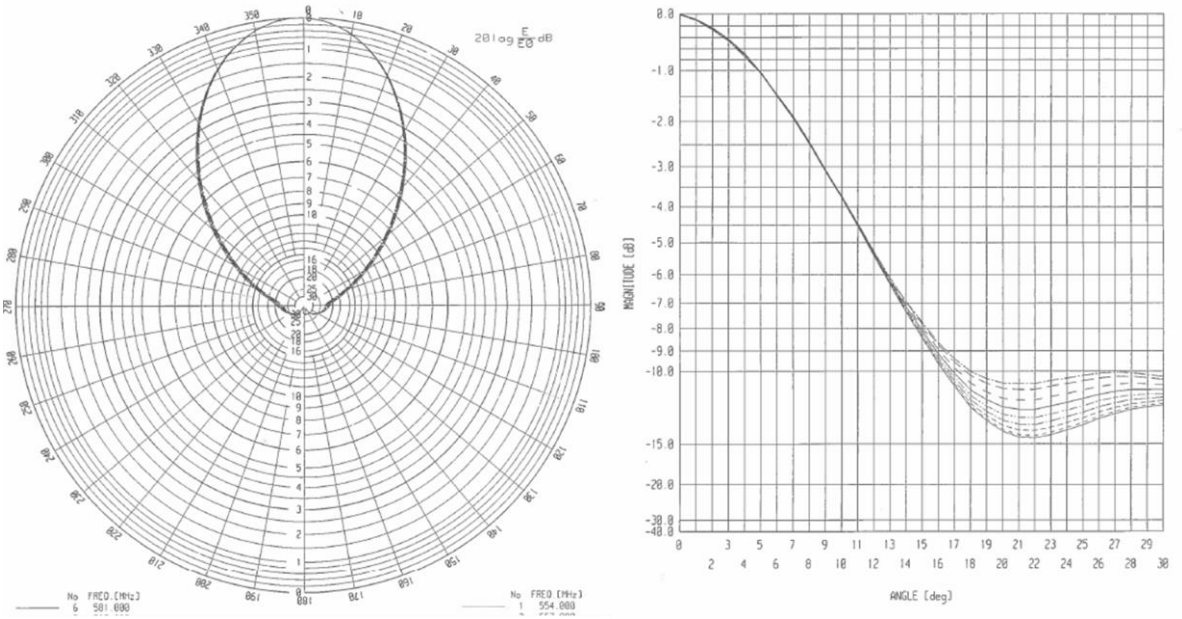

Figura 18 – Cortes do diagrama horizontal e vertical da antena de transmissão polarizada verticalmente.

Apesar de ser possível utilizar MIMO em dupla polarização com duas antenas, cada uma polarizada diferentemente, uma antena como a apresentada anteriormente permite um desempenho de cobertura bastante similar e consistente em ambas as polarizações. Se observadas as Figura 17 e Figura 18, as mínimas discrepâncias entre os diagramas fazem com que se espere medidas levemente diferentes ao analisarmos as mesmas.

3.2 Setup de Recepção

Durante o período de testes e demonstração foram realizados em torno de 60 medidas pela cidade do Rio de Janeiro. Para realizar essas medidas foi criado o *setup* apresentado na Figura 19, montado em um carro.

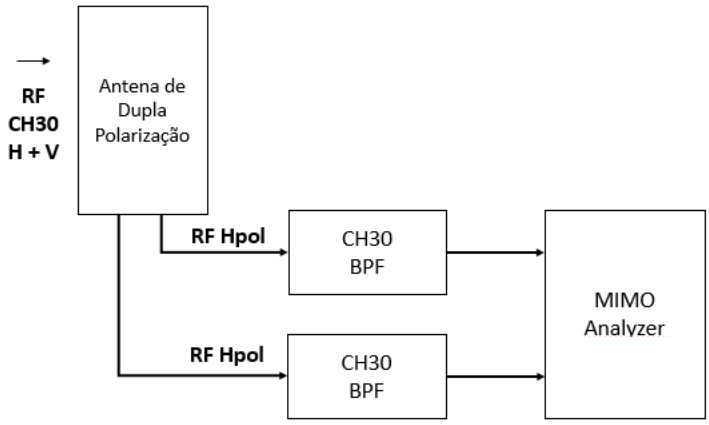

Figura 19 – Diagrama de medidas utilizado neste trabalho.

Utiliza-se uma antena de dupla polarização do tipo Yagi, como também do tipo painel em um mastro preso ao teto do carro medidas. Ele foi estendido a uma altura de 10m do chão (2,5 m do carro acrescidos de 7,5 m do mastro), conforme a Figura 20. O sinal recebido (por polarização) alimenta a entrada do filtro de canal e chega ao analisador experimental utilizado na campanha.

Figura 20 – Carro de medidas com mastro utilizado na campanha.

Para cada medida feita na campanha, posicionava-se a antena receptora na direção da antena transmissora em linha de visada, ajustando-se a orientação em função da medida de potência no espectro (à esquerda na Figura 21) e, após isso, eram feitas medidas utilizando o analisador experimental cedido pela NHK e NEC (à direita na Figura 21). O conjunto de medidas realizadas em cada ponto é ilustrado na Figura 21, ele inclui: constelação de símbolos, resposta do canal, MER (*modulation error ratio*), *condition number* [36] e potência recebida.

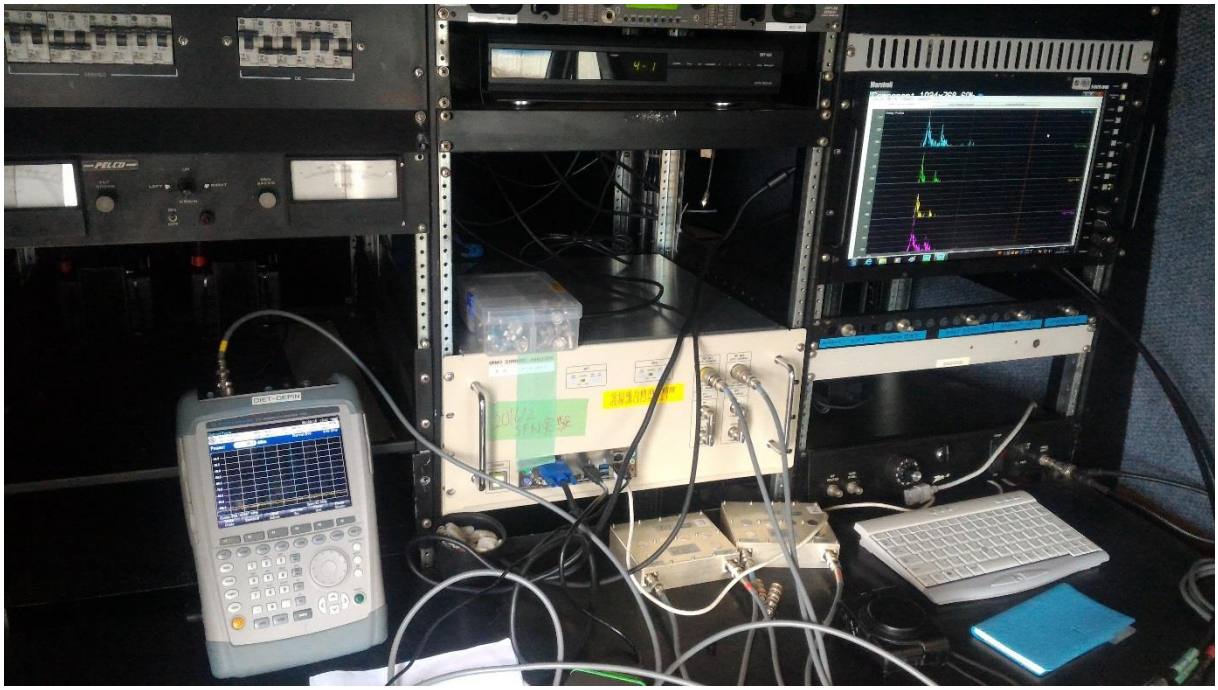

Figura 21 – Setup de medidas montado na bancada no interior do carro.

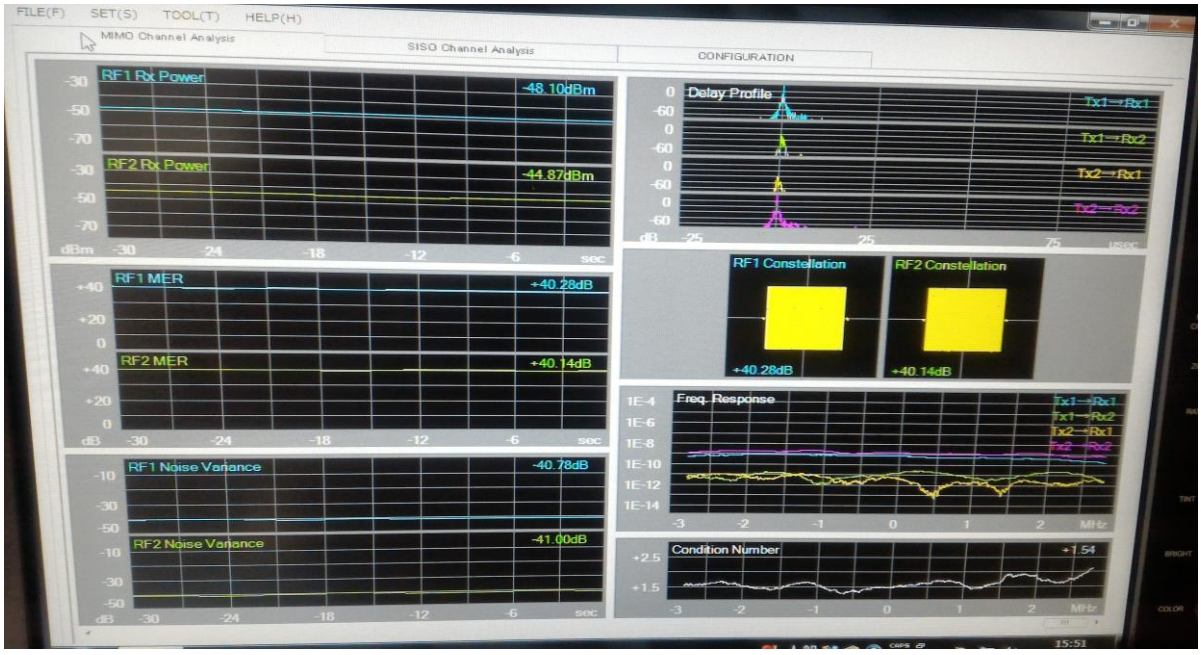

Figura 22 – *Display* do analisador experimental com todas as suas medidas.

Em cada ponto foram feitas de uma a duas medidas de qualidade de sinal (apresentadas na próxima seção, resultantes da integral no tempo por ponto) uma com a antena do tipo Yagi e outra, com a antena do tipo painel (a Tabela 6

apresenta as principais informações de cada uma das antenas). Cada medida dura 1 segundo e provê informações de ambas as polarizações.

Tabela 6 – Características do Sistema de Recepção

Ganho da antena Yagi na polarização horizontal	9,2 dBd
Ganho da antena Yagi na polarização vertical	10,3 dBd
Ganho da antena painel na polarização horizontal	7,5 dBd
Ganho da antena painel na polarização vertical	6,3 dBd
Perda dos cabos	1,2 dB

Cada uma das antenas de recepção, assim como a antena de transmissão, possui dupla polarização, ambas foram fabricadas no Japão e foram cedidas para os experimentos pela NHK.

3.3 Dados Coletados

A campanha de medidas ocorreu entre os meses de julho e agosto de 2016 e provê informações sobre as características da cobertura em cerca de 30 pontos, que se encontram em medidas a uma altura efetiva h_{ef} de 700 m da estação transmissora, na mancha de atendimento (mancha amarela na Figura 23) da estação transmissora. Esse contorno de atendimento chega em pontos que distam mais de 30 Km da estação transmissora que compreende grande parte da região urbana da cidade do Rio de Janeiro.

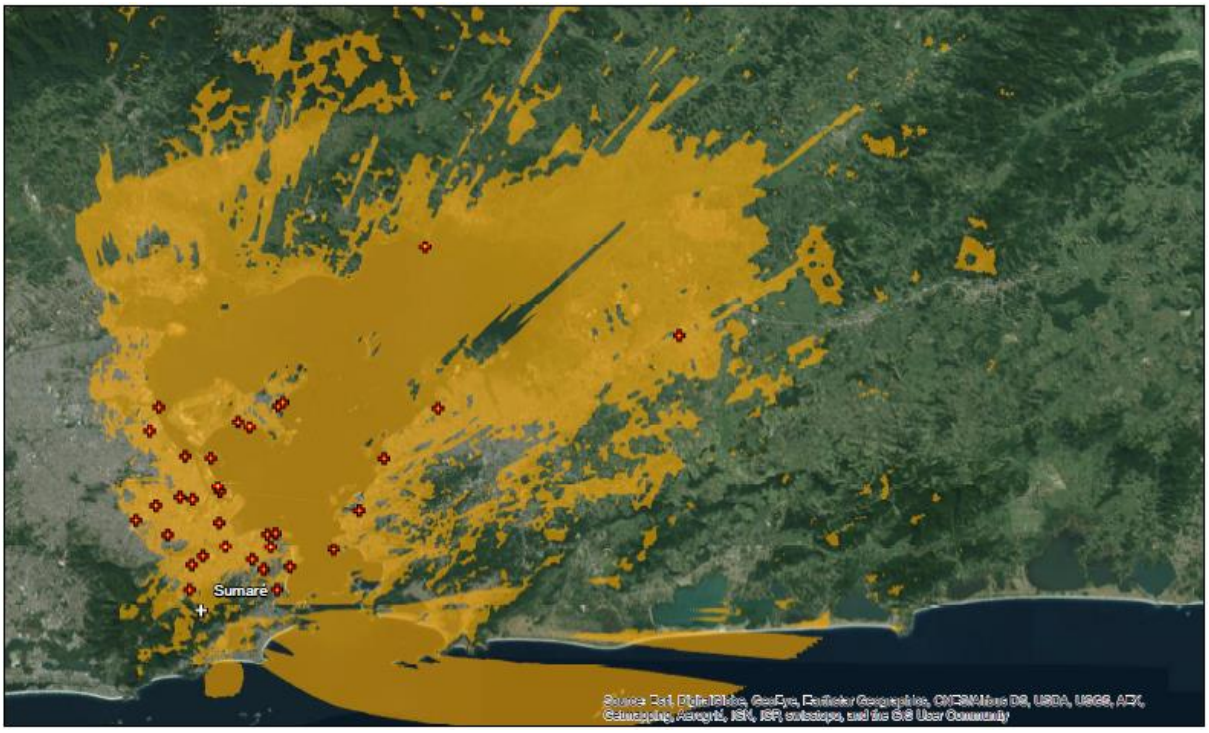

Figura 23 – Pontos de coleta em vermelho na mancha de atendimento prevista da estação transmissora, em amarelo.

Em cada ponto eram coletados os principais dados para a caracterização de um sinal MIMO OFDM: potência recebida em dBm, MER, que é o erro de modulação em função das posições relativas dos símbolos na constelação [20], resposta ao impulso do canal, *condition number* [36] e variância do ruído (assumindo o ruído AWGN de média zero, sua potência é equivalente à variância do mesmo [37]). Todas essas medidas eram exibidas na tela do analisador (Figura 22).

Para cada ponto era gravado 1 segundo de medida em um arquivo *raw* que após ser tratado nos permitiu realizar a análise presente neste trabalho e outros estudos [35]. Neste trabalho são analisadas as distribuições de potência por polarização e as características do ponto de recepção (distância entre transmissor e receptor, a altura de sua antena com relação ao nível do mar, azimute e elevação da antena transmissora da recepção). A Figura 24 mostra a relação entre distância, potência e polarização nos pontos medidos.

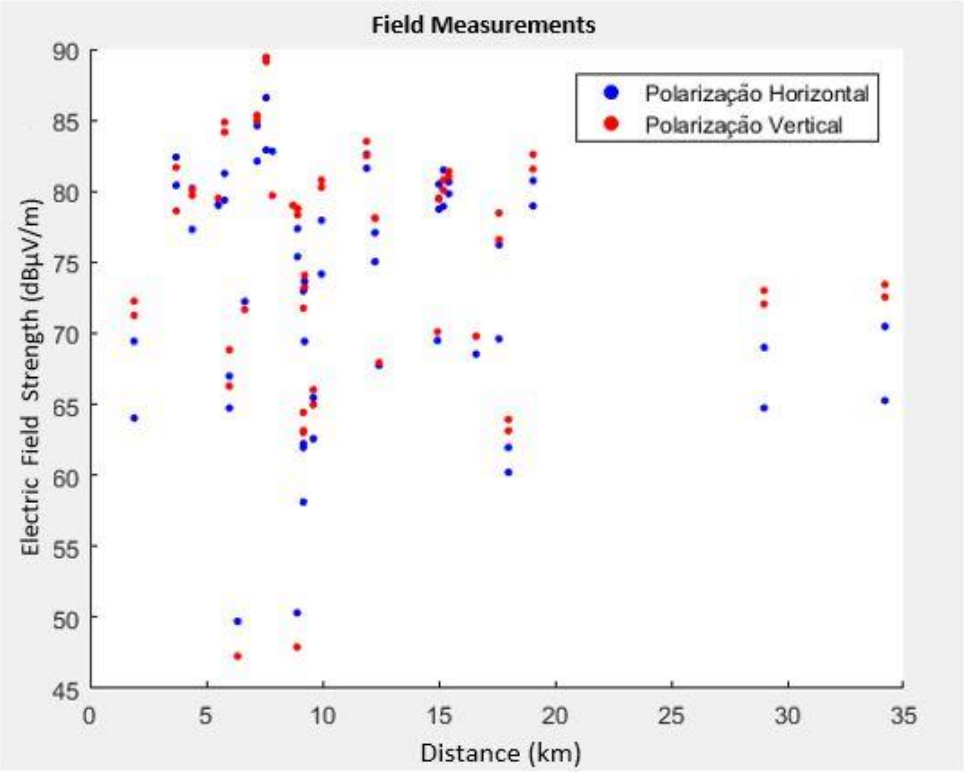

Figura 24 – Medidas de intensidade de campo elétrico por polarização em função da distância nos pontos de medidas mostrados na Figura 23.

As medidas de campo elétrico apresentadas na Figura 24 são médias da distribuição da intensidade do campo elétrico durante um segundo. A Figura 25 apresenta um conjunto de medidas realizadas durante o período de 24 horas em um ponto fixo na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Figura 26). Desses gráficos, vê-se que a variação da mesma não é suficiente significativa no período de um dia.

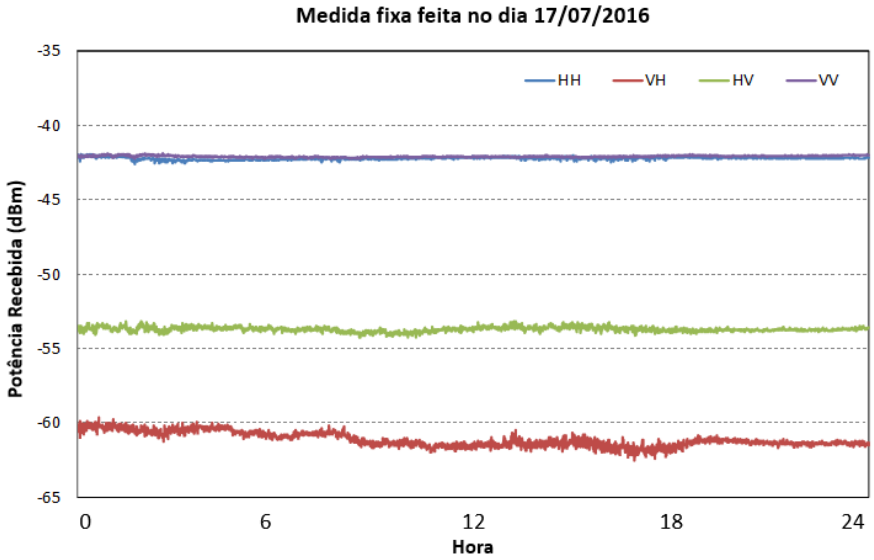

Figura 25 – Resultado de 24 horas da medida fixa realizada na Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Figura 26 – *Setup* de medidas montado para realização da medida fixa na Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Um detalhe interessante a ser mencionado é que as distribuições entre as medidas em cada polarização são levemente diferentes. A Figura 27 e Tabela 7

mostram que as medidas de intensidade de campo elétrico realizadas durante o intervalo de um segundo para a polarização horizontal são, na média, menores do que as feitas na polarização vertical nas mesmas condições, além de apresentarem variância um pouco menor.

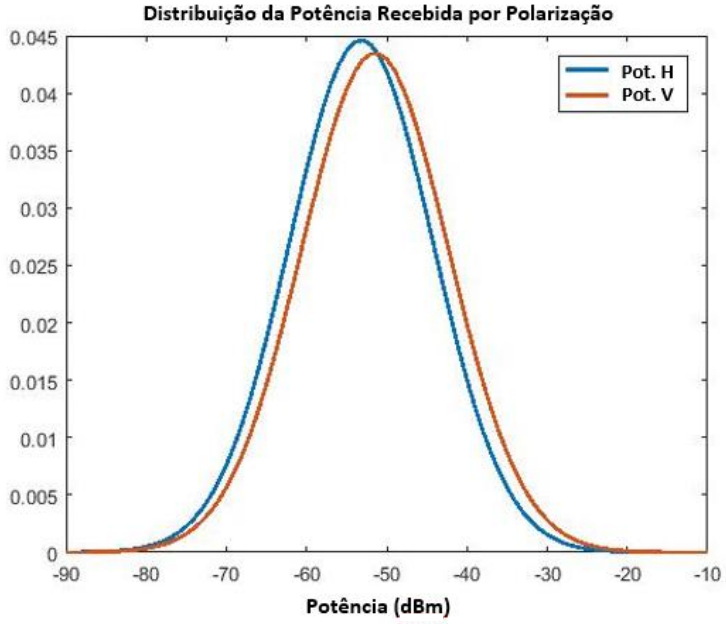

Figura 27 – Distribuição das medidas feitas em campo nas polarizações horizontal (vermelho) e vertical (azul)

Tabela 7 – Média e variância das distribuições de potência das medidas feitas nas polarizações horizontal e vertical

	Média (dBm)	Variância
Potência medida na polarização horizontal	-51,1694	75,2269
Potência medida na polarização vertical	-49,2785	72,4711

No Capítulo 5 comparam-se as medidas de intensidade de campo elétrico com a previsão feita a partir do modelo de propagação ITU-R P. 1546 e avalia-se o

seu desempenho nesse cenário e compará-lo aos resultados da otimização aplicada no Capítulo 4.

4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P. 1546

Para a otimização do modelo de propagação ITU-R P.1546 foram utilizados dois métodos: gradiente descendente e Newton-Raphson; métodos mais simples se comparados à otimização com algoritmos genéticos feita em [38]. O critério de otimização é a minimização do MSE (*mean square error*), ou erro quadrático médio. Ele é utilizado para ajustar os parâmetros das fórmulas da ITU-R P.1546, tornando o modelo mais acurado com relação às medidas de campo descritas no Capítulo 3.

4.1 Função Objetivo

Seja $E_M(\boldsymbol{T}, \boldsymbol{R})$ a intensidade do campo elétrico transmitido de um transmissor na posição $\boldsymbol{T}$ e por um receptor na posição $\boldsymbol{R}$. A partir desses dois parâmetros, pode-se calcular a distância d e a altura efetiva h_{eff} e assim calcular a intensidade de campo elétrico $E_P(d, h_{eff}, \boldsymbol{p})$ utilizando a ITU-R P.1546. Nesse caso, a variável $\boldsymbol{p}$ representa o conjunto de parâmetros do modelo ITU-R P.1546, a distância *d*, a altura efetiva h_{eff}, que dispomos de cada medida (diferentes pares $\boldsymbol{T}$,$\boldsymbol{R}$).

Considerando que dispomos de várias medidas, o MSE entre os valores medidos e preditos via ITU-R P.1546 (usando um conjunto $\boldsymbol{p}$ específico) é dado por

$$\boldsymbol{MSE}(\boldsymbol{p}) = \sum_{i=1}^{L} \left(E_M(\boldsymbol{T}_i, \boldsymbol{R}_i) - E_P\left(d_i, h_{eff,i_i}, \boldsymbol{p}\right) \right)^2, \tag{25}$$

$$\boldsymbol{MSE}(\boldsymbol{p}) = \sum_{i=1}^{L} (E_M(d_i, h_{eff,i}) - E_P(d_i, h_{eff,i}, \boldsymbol{p}))^2, \tag{26}$$

onde $\boldsymbol{T}_i$ e $\boldsymbol{R}_i$ denotam a posição do transmissor e a posição do receptor, respectivamente, na medida i com distância d_i e altura efetiva $h_{eff,i}$. Na campanha de medidas realizada, a posição $\boldsymbol{T}_i$ é fixa dado que o transmissor nunca muda de posição.

O objetivo da otimização é obter o valor ótimo de $\boldsymbol{p}$ em P, isto é

$$\hat{\boldsymbol{p}} = arg_{\boldsymbol{p} \in P} \min \boldsymbol{MSE}(\boldsymbol{p}). \quad (27)$$

Essa otimização pode ser feita utilizando métodos de otimização do gradiente descendente ou o de Newton-Raphson [39], que são de simples implementação, entre outros.

A otimização pode considerar: 1) todo o conjunto de medidas da campanha; 2) as medidas feitas em diferentes polarizações, horizontal e vertical. A otimização deve avaliar o ganho de assertividade, a redução do erro médio quadrático derivado das medidas de campo, do modelo derivado a partir da otimização com relação de comparação ao modelo original da ITU-R P.1546.

4.2 Método de Otimização do Gradiente Descendente

4.2.1 Histórico

O método do gradiente descendente foi apresentado pela primeira vez em 1847 por Cauchy em *Méthode pour la résolution des systèmes d'equations*, no qual o utilizava pela primeira vez como gradiente negativo com o objetivo de minimizar/maximizar uma função [40], para computar as órbitas de corpos celestes, utilizando equações que representam seus movimentos, tomando como desconhecidos os elementos da própria órbita [41]. Cauchy propõe encontrar o mínimo dessa função andando passos na direção contrária ao seu gradiente aproximado.

4.2.2 O Método

Objetiva-se atualizar o conjunto de parâmetros $\boldsymbol{p}$ iterativamente por meio do gradiente [42] da função objetivo. Na iteração *n* faz-se

$$\boldsymbol{p}^{(n)} = \boldsymbol{p}^{(n-1)} - \lambda \nabla \boldsymbol{MSE}\left(\boldsymbol{p}^{(n)}\right). \quad (28)$$

Na Equação (28), $\boldsymbol{p}^n$ representa o valor de $\boldsymbol{p}$ na iteração n, ∇ é o operador gradiente (no caso, aplicado a $MSE(\boldsymbol{p}^n)$) e λ uma constante de ajuste (ajusta a

velocidade de convergência: velocidade do algoritmo e também o tamanho das ondulações em torno do conjunto de parâmetros que minimizam a MSE) [43]. Para implementar essa regra de atualização numericamente é preciso computar $\nabla MSE(p_m^{(n)})$, sendo o índice *m* a coordenada no vetor de parâmetros $\boldsymbol{p}$, podemos definir

$$\nabla MSE\left(p_m^{(n)}\right) = \frac{\boldsymbol{MSE}\left(p_m^{(n-1)} + \delta_m\right) - \boldsymbol{MSE}\left(p_m^{(n-1)}\right)}{\delta_m}, \tag{29}$$

onde δ_m é nulo para todas as coordenadas, mas não para a m-ésima coordenada, para a qual é suficientemente pequeno.

Assim, pode-se enfrentar o problema de otimização calculando-se a derivada a cada incremento/decremento em um dos parâmetros de $\boldsymbol{p}$.

4.2.3 Implementação

As equações (28) e (29) permitem obter a m-ésima coordenada do gradiente. Para evitar escolher δ_m e instabilidades numéricas foi adotado como fator de atualização para cada coordenada,

$$\delta_m^{(n)} = \alpha_m^{(n)} \left[\frac{\boldsymbol{MSE}\left(p_m^{(n-1)}\right) - \boldsymbol{MSE}\left(p_m^{(n-2)}\right)}{2}\right], \tag{30}$$

onde $\alpha_m^{(n)}$ é um número positivo pequeno, aqui é usado o valor de $p_m/10$.

A atualização do m-ésimo parâmetro de $\boldsymbol{p}$ na iteração n é

$$p_m^{(n)} = p_m^{(n-1)}\left(1 - \delta_m^{(n)}\right). \tag{31}$$

Em cada iteração n, todos os parâmetros p_m em $\boldsymbol{p}$ são otimizados, um por vez. O Algoritmo 1 descreve esse processo, onde $\boldsymbol{MSE}(m,n)$ é uma matriz que armazena o MSE obtido na iteração n ao atualizar a m-ésima coordenada em $\boldsymbol{p}$, que corresponde ao m-ésimo parâmetro do modelo ITU-R P.1546.

Algoritmo 1 – Otimização via gradiente descendente
Inicialização
Inicializar p com os valores propostos na ITU-R P.1546
Faça n = 0
Loop Principal
Repetir
Faça $n = n + 1$
Para m = 1 até 21 faça
Faça $\alpha_m = p_m/10$
Compute $\boldsymbol{MSE}(m,n)$ usando a Equação (26)
Compute $\delta_m^{(n)}$ utilizando a Equação (30)
Atualize $p_m^{(n)}$ usando a Equação (31)
Até que a Equação (32) seja satisfeita

O algoritmo é iterado até que a variação da função objetivo seja insignificante em relação a todos os 21 parâmetros, ou seja, a variação do MSE é praticamente nula. Tal comportamento é avaliado usando

$$\left|MSE\left(\boldsymbol{p}^{(n)}\right) - MSE\left(\boldsymbol{p}^{(n-1)}\right)\right| < \frac{MSE\left(\boldsymbol{p}^{(n)}\right)}{10^{-4}}. \quad (32)$$

Quando a condição acima é assim verdadeira, pode-se considerar que a variação de MSE da iteração n-1 a n é muito pequena e o processo de otimização dos parâmetros pode ser interrompido.

4.3 Método de Otimização de Newton-Raphson

4.3.1 Histórico

Por duas vezes Isaac Newton propôs, em 1669 e 1671 [44], o método hoje conhecido como de Newton, que faz para encontrar as raízes de uma função. E, em 1690 o método foi aprimorado para o uso em qualquer função real por Joseph Raphson, dando origen ao método conhecido como Newton-Raphson [45] [46].

O método empregado hoje, graças a contribuições de diversos matemáticos, como L.A. Cauchy, K. Fourier, Bennet entre outros, foi aperfeiçoado. Outra contribuição importante é a de Goldfeld, Quandt e Trotter [39] que propõem a

substituição da hessiana por uma matriz identidade segundo a regra apresentada na próxima seção. Essa regra é bastante importante dada a dificuldade no cálculo da sua inversa, necessária no algoritmo.

4.3.2 O Método

O método de Newton-Raphson, é um método de otimização de segunda-ordem [39]. Ele parte da aproximação via série de Taylor como da função objetivo,

$$MSE(\boldsymbol{p}+\boldsymbol{\delta}) \approx MSE(\boldsymbol{p}) + \sum_{m=1}^{M} \frac{\partial MSE(\boldsymbol{p})}{\partial p_m}\delta_m + \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{M}\sum_{m=1}^{M} \frac{\partial^2 MSE(\boldsymbol{p})}{\partial p_m \partial_{p_l}}\delta_l \delta_m, \quad (33)$$

assumindo essa aproximação como válida, derivando a equação em relação a δ_m e igualando-a a zero, o que corresponde a um ponto de mínimo, obtemos

$$\frac{\partial MSE(\boldsymbol{p})}{\partial p_m} + \sum_{l=1}^{M} \frac{\partial^2 MSE(\boldsymbol{p})}{\partial p_m \partial_{p_l}}\delta_l = 0, \text{ para m = 1,2, ..., M.} \quad (34)$$

Alternativamente, em forma matricial [39] temos

$$\boldsymbol{d} + \boldsymbol{H} + \boldsymbol{\delta} = 0, \quad (35)$$

sendo $\boldsymbol{d}$ o vetor cujos elementos são $\frac{\partial MSE(p)}{\partial p_m}$ e $\boldsymbol{H}$, a Hessiana da função objetivo, ou seja, cada elemento de $\boldsymbol{H}$ é

$$h_{ml} = \sum_{l=1}^{M} \frac{\partial^2 MSE(p)}{\partial p_m \partial p_l} \quad (36)$$

Assim, o valor que desloca $\boldsymbol{p}$ em direção ao valor que fornece o mínimo de $MSE(\boldsymbol{p})$ é

$$\boldsymbol{\delta} = -\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{d}. \quad (37)$$

4.3.3 Implementação

A Equação (34) retorna o ponto ótimo caso a série de Taylor seja uma aproximação suficientemente boa e a Hessiana seja invertível [39], condições que nem sempre são alcançadas. Dessa forma, define-se uma atualização iterativa através da regra

$$\boldsymbol{p}^{(n)} = \boldsymbol{p}^{(n-1)} + \boldsymbol{\delta}^{(n)} = \boldsymbol{p}^{(n-1)} + \boldsymbol{\alpha}^{(n)}\boldsymbol{\delta}'^{(n)}, \text{ com } \boldsymbol{\delta}'^{(n)} = -\boldsymbol{H}^{(n-1)}\boldsymbol{d}^{(n)}. \quad (38)$$

Ela provê um caminho a ser seguido por $\boldsymbol{p}$ em função da iteração $n, \boldsymbol{\alpha}$.

Ainda assim, a Hessiana precisa ser modificada a cada iteração [39]. Utiliza-se a mesma estratégia de [47] definindo a Hessiana modificada

$$\widehat{\boldsymbol{H}}^{(n)} = \frac{\boldsymbol{H}^{(n)} + \gamma \boldsymbol{I}_M}{1+\gamma}, \quad (39)$$

sendo γ o maior elemento em módulo de $\boldsymbol{H}^{(n)}$.

Algoritmo 2 – Otimização via Newton-Raphson
Inicialização

Inicializar **p** com os valores da curva da ITU-R P.1546
Faça n = 0
Repetir
Aleatoriza-se a matriz de dados

Loop Principal
Repetir
Faça n = n + 1
Para m = 1 até 21 faça

Faça $\alpha_m = p_m/10$
Compute MSE(m,n) usando a Equação (26)
Compute $\frac{\partial MSE(m,n)}{\partial p_m}$
Compute $\frac{\partial^2 MSE(m,n)}{\partial p_m}$

Compute $\boldsymbol{H}^{(n)}$ usando a Equação (39)

Compute $\boldsymbol{\delta}^{(n)}$ e $\boldsymbol{p}^{(n)}$ utilizando a Equação (38)

Até que a Equação (32) seja satisfeita

O critério de parada é o mesmo utilizado na implementação do Gradiente Descendente, porém considerando que esse método por natureza gera oscilações na curva de otimização [48]. O método de Newton-Raphson é bastante adequado nesse caso tanto pela sua simples implementação quanto pela sua natureza de segunda ordem que pode fazer um *fitting* mais preciso a curva de predição de campo elétrico da ITU-R P.1546.

5 RESULTADOS DAS OTIMIZAÇÕES DO MODELO DE PROPAGAÇÃO

Com as medidas do Capítulo 3 e os algoritmos apresentados nas seções anteriores podemos otimizar os parâmetros do modelo de propagação ITU-R P.1546 empregados para o cálculo do campo elétrico. Além da potência medida pelo analisador Pot_R, considera-se também a perda nos cabos P_C, o ganho da antena receptora na polarização em questão G_R e a perda por desfocalização P_{Apt} entre as estações transmissora e receptora. Assim temos que a potência recebida estimada $Pot_R{}'$ é

$$Pot_R' = Pot_R + P_C + P_{Apt} + G_R(pol), \tag{40}$$

essa é convertida para a unidade de campo elétrico dBμV/m usando

$$E = Pot_R' + 77.2 + 20 \cdot log_{10}(f). \tag{41}$$

Com os valores de campo eletromagnético estimados pode-se calcular o erro relativamente aos medidos e aplicar nos algoritmos de otimização de forma a obter o conjunto $\boldsymbol{p}$, como descrito no capítulo anterior [49].

5.1 Resultados com o Gradiente Descendente

5.1.1 Convergência

O método do gradiente descendente converge segundo o critério da Equação (28), após aproximadamente 700 iterações com pequenas variações em função do conjunto de dados considerado na otimização (polarização horizontal, polarização vertical e duas polarizações) [48]. A Figura 28 apresenta o comportamento do MSE considerando dados referentes ao arranjo de polarização horizontal, a Figura 29, considerando a polarização vertical, e a Figura 30, ambas conjuntamente.

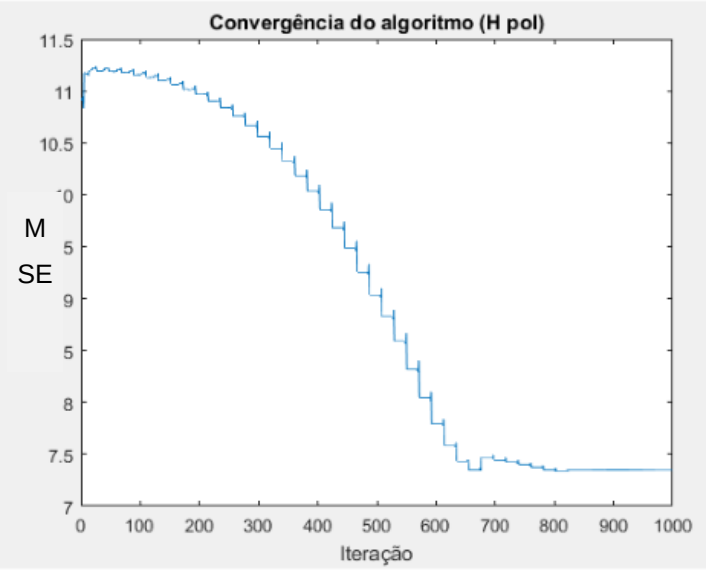

Figura 28 – Desempenho do Algoritmo do Gradiente Descendente para a polarização horizontal, MSE x iteração.

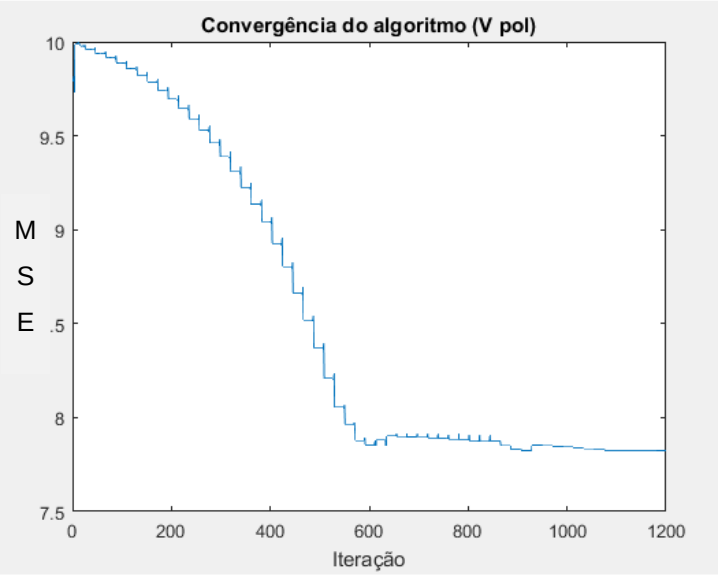

Figura 29 - Desempenho do Algoritmo do Gradiente Descendente para a polarização vertical, MSE x iteração.

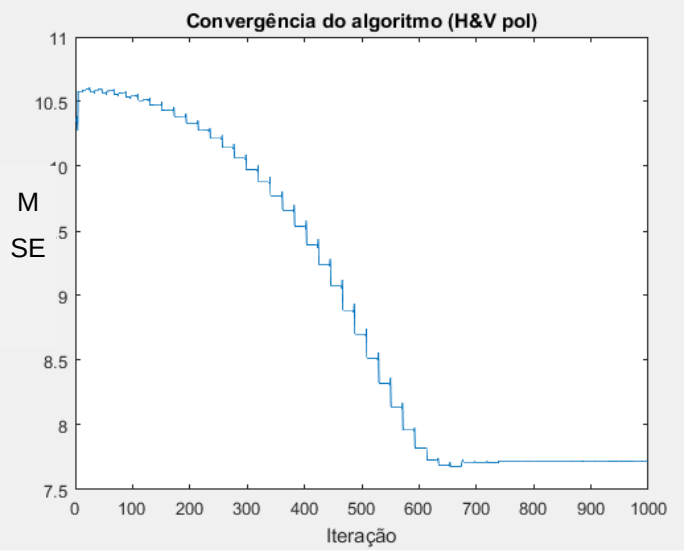

Figura 30 - Desempenho do Algoritmo do Gradiente Descendente para as polarizações horizontal e vertical, MSE x iteração.

Observa-se dos gráficos nessas figuras que todas as otimizações convergem semelhantemente, independentemente do conjunto de dados utilizado.

5.1.2 Resultados

Na Tabela 8 são apresentados os valores dos parâmetros sintonizados para cada um dos conjuntos de medida em comparação com os parâmetros encontrados na ITU-R P.1546 [8]. A partir desses números, podemos observar que o conjunto de dados medidos na polarização horizontal tem bastante influência nos parâmetros do subconjunto *c*, enquanto os da polarização vertical nos do subconjunto *b*. Já para o conjunto de dados combinados, o modelo é capaz de atender melhor o conjunto de polarização vertical, mostrando variação maior dos parâmetros para o conjunto subconjunto *b*.

Ao comparar os valores de campo elétrico medidos com os obtidos com os parâmetros otimizados e com os obtidos com os parâmetros originais da ITU-R P. 1546, observa-se uma melhoria de 2 a 3 dB no MSE dependendo da polarização escolhida, como apresentado na Tabela 9; a partir dessa tabela, observa-se ainda que os parâmetros resultantes da otimização obtêm valores de MSE, que não são significativamente diferentes em função da polarização.

Tabela 8 – Comparação entre os parâmetros da ITU-R P.1546 e os otimizados pelo método do gradiente descendente

Parâmetro	**ITU**		**Gradiente Descendente**					
	100 MHz	**600 MHz**	**569 MHz H**	**Variação (%)**	**569 MHz V**	**Variação (%)**	**569 MHz H + V**	**Variação (%)**
a_0	0,0814	0,0946	0,0766	19,0275	0,0801	15,3277	0,0754	20,2960
a_1	0,7610	0,8849	0,7165	19,0304	0,7492	15,3351	0,7030	20,5560
a_2	-30,4440	-35,3990	-28,6608	19,0350	-30,3188	14,3513	-28,8779	18,4217
a_3	90,2260	92,7780	75,2615	18,8800	80,9980	12,6970	75,4150	18,7146
b_0	33,6238	51,6386	42,8061	17,1045	136,4863	164,3106	162,3178	214,3342
b_1	10,8917	10,9877	9,1083	17,1046	29,0417	164,3110	34,5381	214,3342
b_2	2,3311	2,2133	1,8331	17,1780	5,8447	164,0717	6,9509	214,0514
b_3	0,4427	0,5384	0,4463	17,1062	1,4230	164,3016	1,6924	214,3388
b_4	1,26E-07	4,32E-06	3,58E-06	17,1039	1,14E-05	164,3072	1,36E-05	214,3419
b_5	1,7750	1,5200	1,2600	17,1053	4,0175	164,3092	4,7779	214,3355
b_6	49,3900	49,5200	41,0498	17,1046	130,8866	164,3106	155,6583	214,3342
b_7	103,0100	97,2800	80,6407	17,1045	257,1213	164,3105	305,7843	214,3342
c_0	5,4419	6,4701	5,3634	17,1048	17,1012	164,3112	20,3377	214,3336
c_1	3,7364	2,9820	8,9862	201,3481	7,8817	164,3092	9,3734	214,3327
c_2	1,9457	1,7608	5,3050	201,2835	4,6529	164,2492	1,4385	18,3042
c_3	1,8450	1,7508	1,4513	17,1065	4,6275	164,3077	1,4307	18,2831
c_4	415,9100	198,3300	597,6668	201,3497	524,2071	164,3105	162,0655	18,2849
c_5	0,1128	0,1432	0,4315	201,3268	0,3785	164,3156	0,1170	18,2961
c_6	2,3538	2,2690	6,8376	201,3486	5,9972	164,3103	7,1322	214,3323
d_0	10,0000	5,0000	15,0675	201,3500	13,2155	164,3100	15,7167	214,334
d_1	-1,0000	1,2000	3,6162	201,3500	3,1717	164,3083	3,7720	214,3333

Tabela 9 – Comparativo entre os erros médio e máximo do modelo otimizado pelo método do gradiente descendente com o da ITU-R P.1546.

	MSE (dB)		Erro máximo (dB)	
	ITU	Otimizado	ITU	Otimizado
Polarização Horizontal	10,92	7,34	38,46	27,37
Polarização Vertical	9,80	7,82	40,91	34,31
Polarizações Horizontal + Vertical	10,64	7,72	40,91	29,69

Outra característica importante observada nos resultados é a grande redução observada no erro máximo com os parâmetros otimizados que chega a ser até 10 dB menores, em alguns casos. Isso garante que a discrepância entre os valores medido e predito não seja tão grande, o que confere maior acurácia na previsão ponto a ponto do nível de campo elétrico e consequentemente na obtenção de uma mancha de atendimento mais próxima à real.

5.1.3 Avaliação Cruzada

Para avaliar os efeitos da polarização na sintonia do modelo obtém-se o modelo otimizado com uma polarização e em seguida aplica-se nos demais. A princípio, espera-se que o resultado para a polarização em que a otimização foi feita sejam melhores do que para os demais conjuntos de dados. Os resultados desse cruzamento são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparativo dos resultados cruzados das otimizações no método do gradiente descendente

	Polarização					
	H	ΔH	V	ΔV	H&V	ΔH&V
H	X	X	7,99	+ 0,17	7,92	+ 0,20
V	8,00	+ 0,66	X	X	7,52	- 0,20
H&V	7,70	+ 0,36	8,03	+ 0,21	X	X

Observa-se que os parâmetros otimizados para uma determinada polarização têm melhor desempenho para ela do que para a outra. Para o caso H + V, a otimização feita na polarização apresenta menor MSE do que a feita para a polarização vertical, isso reflete os resultados da otimização H+V que apresenta menor erro para a parte do conjunto de dados referentes as medidas coletadas na polarização horizontal.

Na Figura 31 podemos observar as curvas otimizadas para cada polarização. Nela, podemos observar que a atenuação do campo elétrico irradiado é muito menos intensa na região onde as medida foram realizadas (entre 10 e 20 km de distância e h_{eff} de 700 m). Enquanto isso, para a polarização horizontal observa-se uma curva

muito mais suave. Isso se dá pois a atenuação por difração é mais severa na polarização vertical do que na horizontal [50].

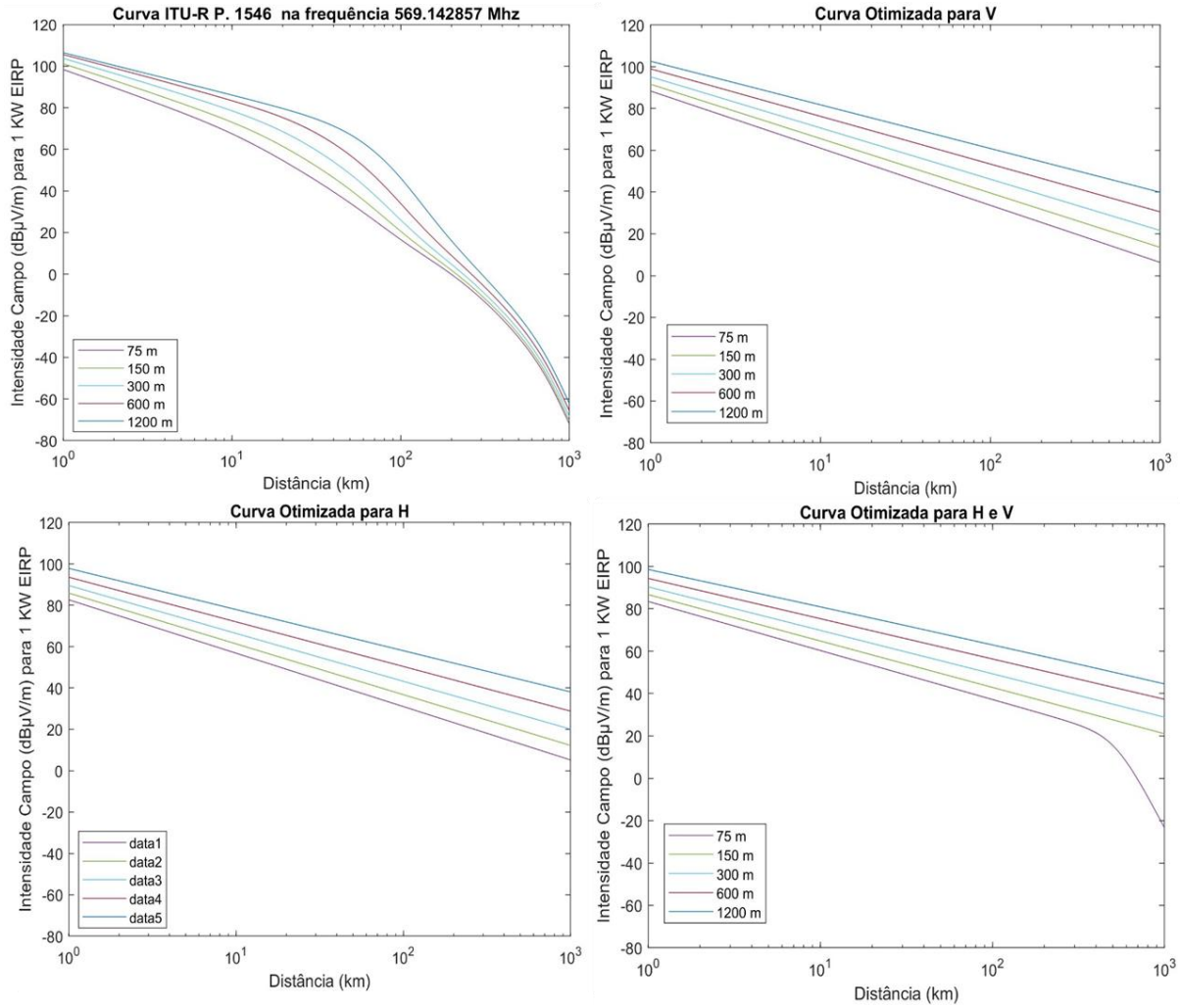

Figura 31 – Curvas de atenuação da norma ITU-R P.1546 otimizadas pelo método do Gradiente Descente por polarização na frequência de 569,142857 MHz.

5.2 Método de Otimização de Newton-Raphson

5.2.1 Análise da Convergência

O método de Newton-Raphson converge segundo o critério da Equação (38) [48] após aproximadamente 1600 iterações na polarização horizontal com variações de até 20% a cada vez em que a iteração é executada. Neste caso, o desempenho do algoritmo é impactado pela ordem na qual os elementos do conjunto de dados

estão dispostos. A Figura 32 apresenta o gráfico de convergência do algoritmo considerando a polarização horizontal.

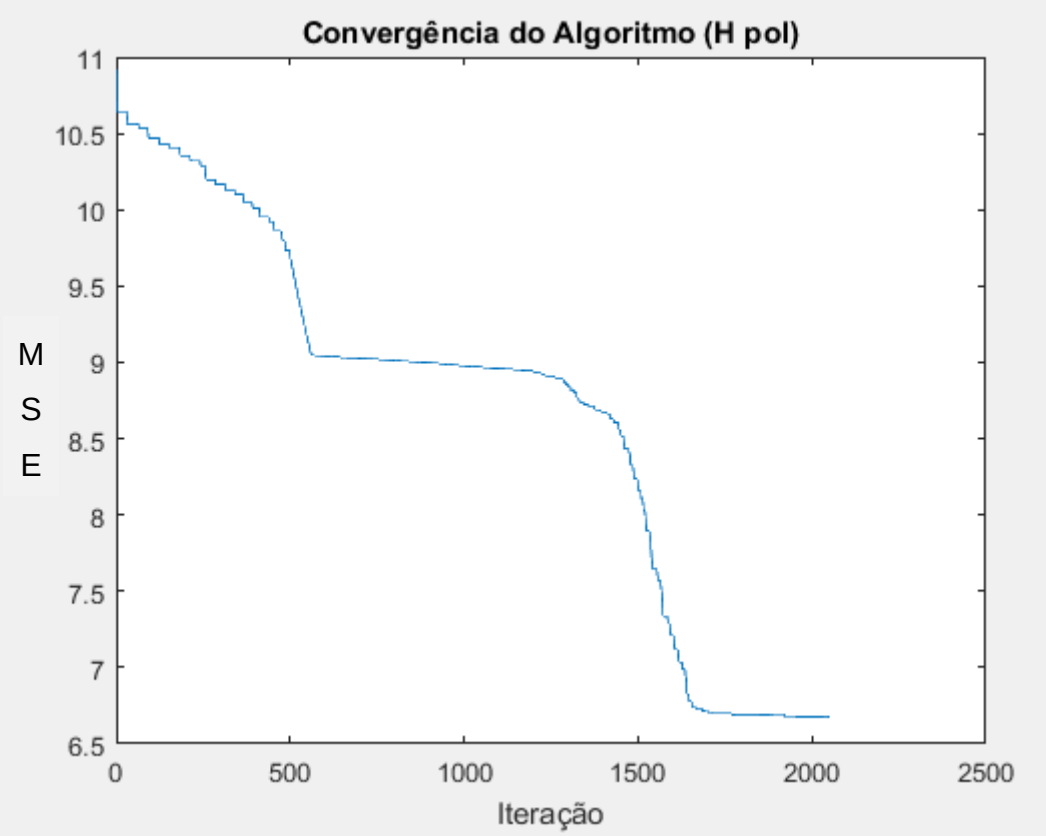

Figura 32 – Desempenho do Algoritmo de Newton-Raphson para a polarização horizontal, MSE x iteração.

Já, o desempenho obtido com a otimização dos parâmetros em função da polarização vertical é um pouco inferior, ainda com pequenas variações cada vez que o algoritmo é executado. Aproximadamente, após 1800 iterações observa-se convergência, conforme apresentado na Figura 33.

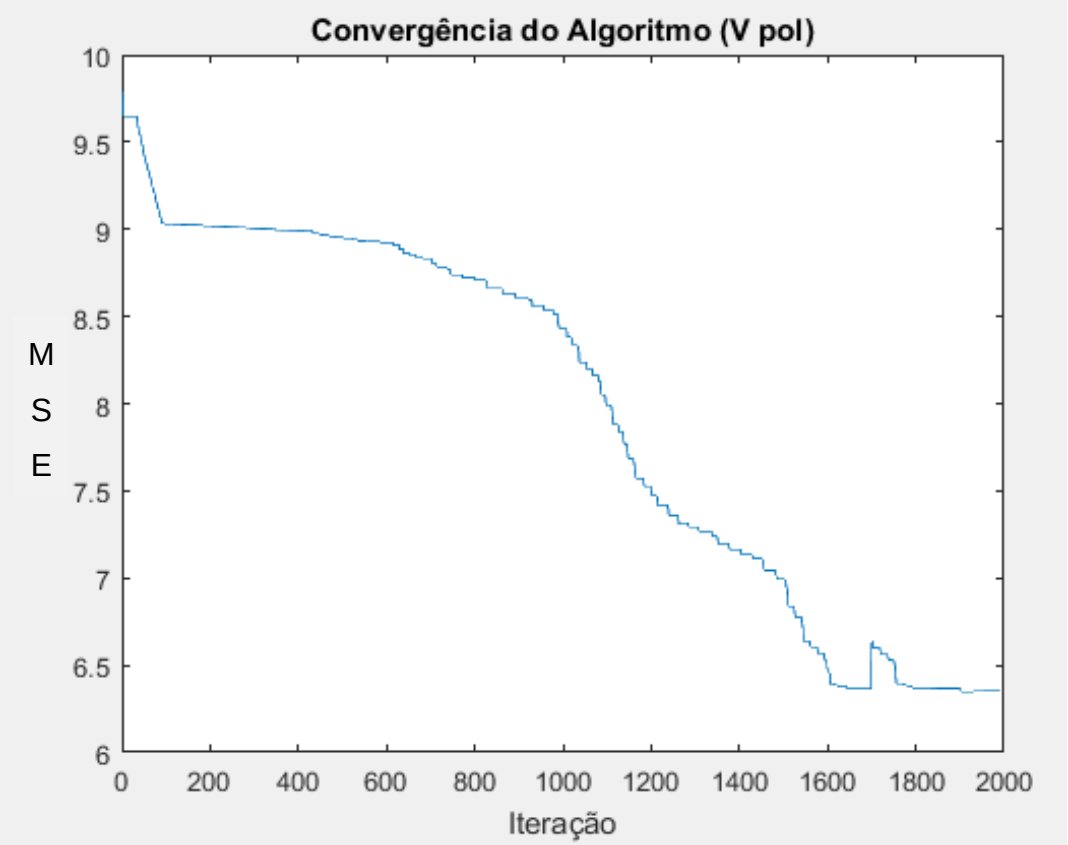

Figura 33 - Desempenho do Algoritmo de Newton-Raphson para a polarização vertical, MSE x iteração.

Quando utilizado o conjunto de dados com as medidas de ambas as polarizações temos melhor desempenho, dado que o conjunto de dados utilizado é maior e após 800 iterações, observa-se a convergência, conforme apresentado na Figura 34. Neste caso também existe variação no desempenho do algoritmo cada vez que é executado.

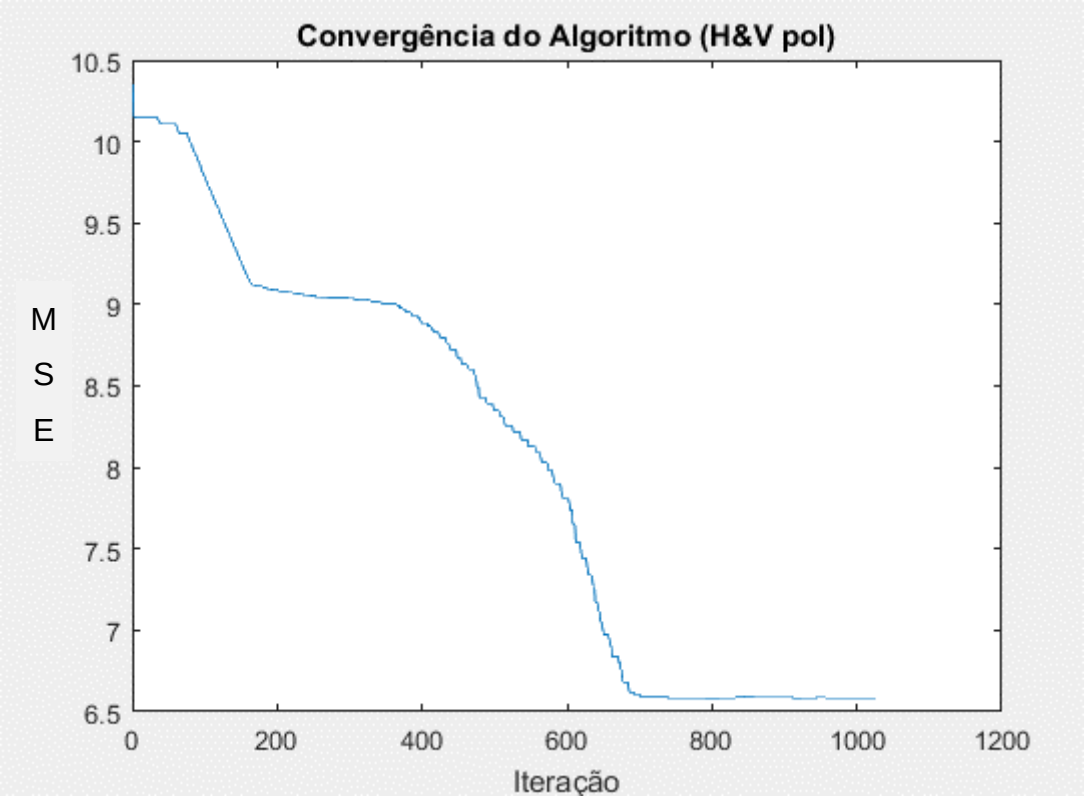

Figura 34 - Desempenho do Algoritmo de Newton-Raphson para as polarizações horizontal e vertical, MSE x iteração.

Dado que o algoritmo apresenta desempenhos ligeiramente diferentes dependendo da ordenação do conjunto de dados, para conseguir melhores resultados, fez-se com que o conjunto de dados fosse embaralhado 100 vezes e para cada embaralhamento aplica-se a otimização. É importante ressaltar aqui que a otimização via Gradiente Descendente não é afetada pela ordenação do conjunto de dados, por isso este estudo não foi apresentado na Seção 5.1.2. Assim, para a otimização em questão foram calculados o MSE e o erro máximo (Emax) entre os valores de campo elétrico medido e predito. A Tabela 11 apresenta os melhores resultados obtidos nas 100 rodadas para os três conjuntos de dados, além das médias.

Tabela 11 - Comparativo entre os erros médio e máximo do modelo otimizado pelo método de Newton-Raphson com o da ITU-R P.1546 em 100 interações

Conjunto de dados	Menor MSE		Média	
	MSE	Emax	MSE	Variância
H&V	6,59	30,63	6,91	42,55
H	6,69	30,57	7,02	42,31
V	6,35	30,16	6,67	44,54

Para verificar a eficiência do método de Newton-Raphson, foi feita a avaliação cruzada entre as diferentes otimizações (usando os parâmetros que conferem o melhor desempenho dentre as 100 rodadas), o resultado é apresentado na Tabela 12. Como vemos, os resultados são melhores para a polarização usada na sintonia dos parâmetros do que para a oposta. E, conforme mostrado na Tabela 11, obtivemos resultados ligeiramente melhores na otimização do conjunto de dados medido na polarização vertical.

Tabela 12 - Comparativo dos resultados cruzados das otimizações no método de Newton-Raphson

	Otimização					
Cruzado MSE	H	ΔH	V	ΔV	H&V	ΔH&V
H	6,68	0	6,70	+0,02	6,73	+0,14
V	6,98	+0,29	6,35	0	6,44	-0,14
HV	6,83	+0,15	6,53	+0,18	6,58	0

A Tabela 13 apresenta uma comparação entre os parâmetros otimizados e os da recomendação ITU-R P.1546 para as frequências de 100 MHz e 600 MHz [8], que são as mais próximas da frequência de trabalho de 569 MHz e, por essa tabela, é possível notar que os parâmetros em geral não variam mais do que 100%, com apenas alguns casos e, mais notadamente o parâmetro b_4 apresenta uma variação acima de uma ordem de grandeza em todos os cenários.

Tabela 13 - Comparação entre os parâmetros da ITU-R P.1546 e os otimizados pelo método de Newton-Raphson

Parâmetro	ITU		Newton-Raphson em 100 repetições					
	100 MHz	600 MHz	569 MHz H	Variação (%)	569 MHz V	Variação (%)	569 MHz H + V	Variação (%)
a_0	0,0814	0,0946	0,0635	32,8753	0,0977	3,2770	0,0926	2,1142
a_1	0,7610	0,8849	0,7420	16,1487	0,8301	6,1928	0,7503	15,2108
a_2	-30,4440	-35,3990	-35,0793	0,9031	-35,0608	0,9554	-35,0750	0,9153
a_3	90,2260	92,7780	90,9965	1,9202	91,5160	1,3602	91,2638	1,6321
b_0	33,6238	51,6386	51,1222	1,0000	51,1222	1,0000	51,1222	1,0000
b_1	10,8917	10,9877	10,8779	0,9993	10,8778	1,0002	10,8779	0,9993
b_2	2,3311	2,2133	2,1804	1,4865	2,1814	1,4413	2,1819	1,4187
b_3	0,4427	0,5384	0,5470	1,5973	0,5457	1,3559	0,5451	1,2444
b_4	1,26E-07	4,32E-06	-0,0311	7,20E+05	-0,0390	9,02E+05	-0,3140	7,26E+06
b_5	1,7750	1,5200	1,5392	1,2632	1,5444	1,6053	1,5422	1,4605
b_6	49,3900	49,5200	49,0286	0,9923	49,0291	0,9913	49,0288	0,9919
b_7	103,0100	97,2800	96,2994	1,0080	96,2990	1,0084	96,2994	1,0080
c_0	5,4419	6,4701	6,3548	1,7820	6,3527	1,8145	6,3549	1,7805
c_1	3,7364	2,9820	2,9531	0,9691	2,9537	0,9490	2,9537	0,9490
c_2	1,9457	1,7608	1,7535	0,4146	1,7515	0,5282	1,7512	0,5452
c_3	1,8450	1,7508	1,7375	0,7597	1,7388	0,6854	1,7385	0,7025
c_4	4,16E+02	1,98E+02	1,96E+02	1,0000	1,96E+02	1,0000	1,96E+02	1,0000
c_5	0,1128	0,1432	-0,3865	3,70E+02	-0,3970	3,77E+02	-0,3879	3,71E+02
c_6	2,3538	2,2690	2,3646	4,2133	2,3760	4,7157	2,3631	4,1472
d_0	10,0000	5,0000	4,9628	0,7440	4,9590	0,8200	4,9617	0,7660
d_1	-1,0000	1,2000	1,2203	1,6917	1,2145	1,2083	1,2175	1,4583

Observando a Figura 35 nota-se que o método de Newton-Raphson altera os parâmetros de forma a obter curvas otimizadas mais próximas às da norma ITU-R P. 1546 na região em que foram realizadas as medidas. Também nota-se que, diferentemente das curvas otimizadas pelo método do gradiente descendente, as curvas da Figura 35 apresentam formas bastante parecidas entre si. Apresentando valores superiores de intensidade de campo para a região da curva correspondente ao conjunto de dados medido (entre 10 e 20 km de distância e h_{eff} de 700 m) do que para distância inferiores à essa região.

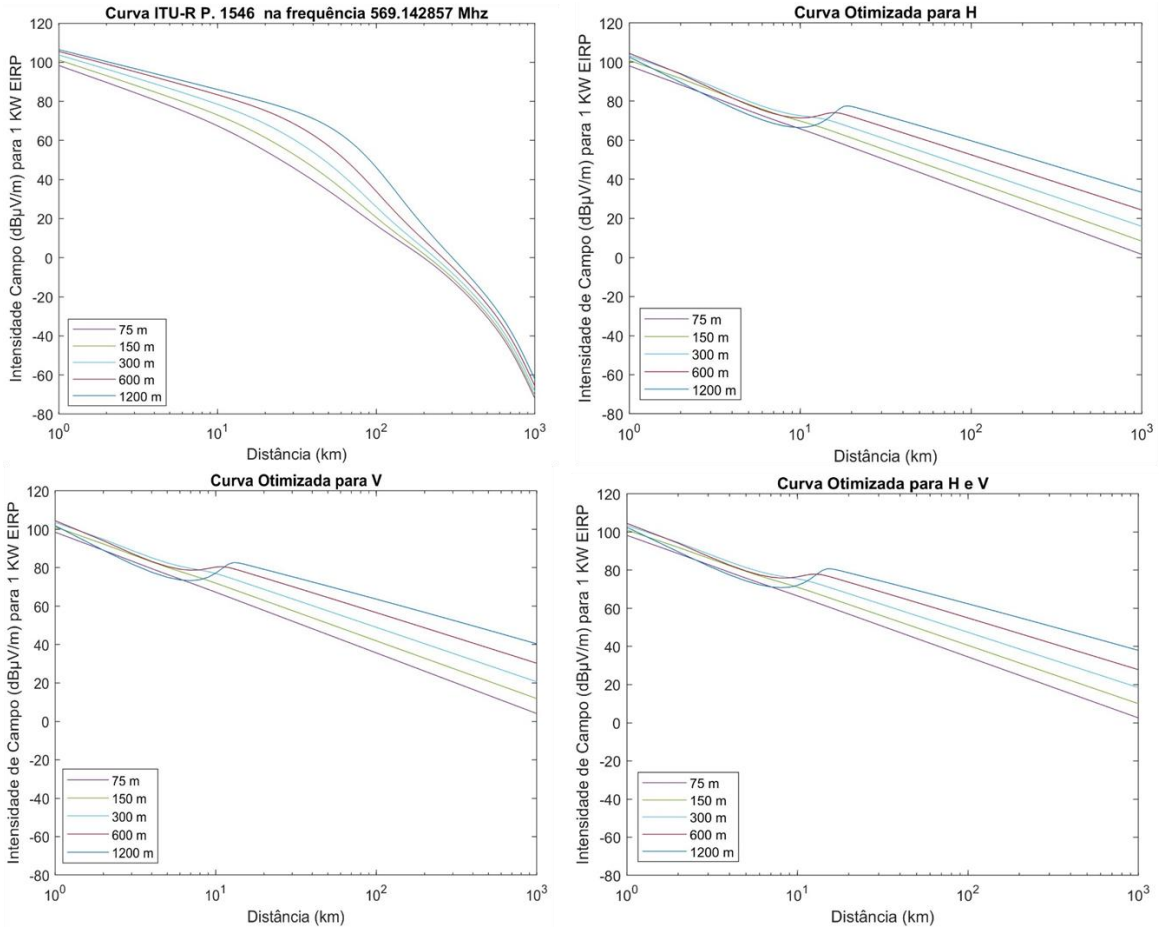

Figura 35 - Curvas de atenuação da norma ITU-R P.1546 e otimizadas pelo método de Newton-Raphson por polarização na frequência de 569,142857 MHz.

5.3 Comparativo entre os métodos

Na Tabela 14 temos a comparação entre os resultados obtidos com ambos os métodos de otimização e cada um dos conjuntos de dados medidos. Ambos os métodos produzem parâmetros que geram valores preditos do campo elétrico mais próximos dos medidos que os calculados com os parâmetros da ITU-R P.1546.

Tabela 14 – Comparativo entre os modelos de predição otimizados pelos métodos Newton-Raphson e gradiente descente com o modelo da norma

Conjunto de dados	ITU		Gradiente descendente		Newton-Raphson	
	MSE	Emax	MSE	Emax	MSE	Emax
H&V	10,64	40,91	7,34	27,37	6,58	30,62
H	10,92	38,46	7,82	34,31	6,68	30,57
V	9,80	40,91	7,72	29,69	6,35	30,16
Média	10,45	40,09	7,63	30,46	6,54	30,45

Os resultados para o método de Newton-Raphson são ligeiramente melhores (cerca de 1dB mais preciso no caso do MSE), isso se dá pois o Newton-Raphson é um método de 2ª ordem, ao contrário do Gradiente Descendente que é de 1ª ordem. Assim, Newton-Raphson consegue obter melhores resultados para as equações não lineares do modelo ITU-R P.1546.

5.3.1 Validação Cruzada

Até aqui, utilizaram-se os conjuntos de medidas inteiras na otimização. Isso pode ser questionado, mas permite avaliar o potencial de melhora que podemos conferir ao modelo ITU-R P.1546. Iremos utilizar validação cruzada de forma a confrontar essas estratégias com um cenário mais real de utilização: i) medidas conhecidas seriam usadas para otimizar os parâmetros do modelo que ii) devem ser usados para prever os valores de campo em toda uma região. Para isso, utilizamos o método conhecido como *holdout*, que consiste em separar o conjunto de dados em dois grupos, um de treinamento e outro de validação. O conjunto é treinado com o primeiro grupo, o resultado é aplicado ao segundo e o erro médio quadrático é calculado [51]. Neste caso, foram usados um grupo de treinamento de 2/3 do grupo total de medidas disponíveis e 1/3 para validação; esse processo é repetido diversas vezes e a cada repetição o conjunto de dados é embaralhado para garantir a maior variabilidade dos conjuntos de validação.

Foram feitas 10 repetições com o conjunto de dados embaralhado e o MSE calculado no conjunto de validação, os resultados são apresentados na Tabela 15 e a média e variância de cada um dos conjuntos de resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 – MSE (dB) resultante da validação cruzada em 10 repetições

Gradiente			Newton Raphson		
Horizontal	Vertical	H&V	Horizontal	Vertical	H&V
9,57	7,30	7,75	6,42	6,46	6,79
7,91	8,75	7,75	7,14	5,61	7,90
8,14	8,21	7,02	7,46	6,65	5,86
6,82	7,05	6,88	6,08	6,12	7,34
5,97	6,14	6,52	8,14	9,39	8,37
9,22	7,50	7,27	6,39	5,74	5,25
8,08	5,49	7,73	8,14	8,63	5,64
6,94	6,25	8,28	8,11	6,50	6,43
7,38	7,08	8,28	9,00	10,40	7,14
7,62	8,53	7,85	8,55	5,04	5,72

Tabela 16 – Média e variância do MSE (dB) resultante da validação cruzada presente na Tabela 16

	Gradiente			Newton Raphson		
	horizontal	vertical	H&V	horizontal	vertical	H&V
média	7,77	7,23	7,53	7,54	7,05	6,65
variância	1,18	1,14	0,35	1,01	3,18	1,09

Os resultados apontam a razoabilidade das estratégias de otimização dos parâmetros da ITU-R P.1546 apresentadas nesta dissertação. O método de Newton Raphson apresenta variância maior, mas o resultado em geral é da mesma ordem do método do Gradiente Descendente.

No capítulo seguinte, utiliza-se o modelo otimizado com os parâmetros sintonizados para a cidade do Rio de Janeiro de forma a tornar o método mais preciso para o tipo de região e relevo.

6 POSICIONAMENTO DE ELEMENTOS IRRADIANTES PARA A COBERTURA DE UMA REGIÃO DE INTERESSE

6.1 O problema

Escolher a posição de um ou mais transmissores de forma a prover o serviço de TV digital aberta em uma determinada região pode ser uma missão bastante difícil, de grande complexidade e que exige experiência do engenheiro que irá projetar essa cobertura. Para determinar as posições ótimas para as estações de uma SFN não basta apenas determinar pontos provendo boa cobertura para cada uma delas, pois, além disso, deve-se também evitar a sobreposição entre as manchas de cobertura correspondentes, aproveitando assim a potência utilizada da melhor maneira possível - um transmissor preenchendo regiões não atendidas pelos demais.

Geralmente, o objetivo do projetista da rede é garantir a cobertura de uma região, ou seja, que o nível de campo elétrico seja igual ou superior a um patamar pré-definido que garante a correta recepção do sinal de TV digital [27]. Dada uma região geográfica, define-se uma Região de Interesse (RI) a qual se pretende atender. A RI pode ser toda a região geográfica considerada ou parte dela. A partir disso, posicionam-se as estações transmissoras na RI ou em sua vizinhança e tenta-se combinar as manchas de cobertura das diversas estações transmissoras com o objetivo de prover uma cobertura conjunta que atenda às especificações de projeto. Mas, como visto na Seção 1.3, essa tarefa pode ser bastante difícil, pois se as mesmas não estiverem com potência e atraso relativo adequados, poderão gerar regiões de interferência e prejudicar a cobertura da RI.

Pode-se abordar este problema de maneira bastante simplificada como em [12] onde é utilizada uma simples distribuição espacial das estações de forma a combinar de maneira adequada suas diferentes manchas de cobertura, ou de maneira mais complexa como em [12] [14] onde, além das manchas de coberturas, os atrasos da rede e o IG são também calculados utilizando modelos de *fitting* complexos.

A abordagem aqui utilizada será uma busca heurística por soluções adequadas para o atendimento da cobertura de uma determinada região. Buscas

heurísticas são estratégias de busca informadas, que utilizam conhecimento prévio sobre o problema de forma a facilitar a busca da solução e assim, torná-la mais eficiente que buscas não informadas [15]. Utilizando conhecimento sobre projetos de SFN, pode-se elaborar abstrações de variáveis para compor esse modelo de forma a tornar a busca mais eficiente se comparada à busca por força bruta e ainda agregá-lo a conceitos de busca com memória e aprendizado. Essas abordagens serão melhor detalhadas nas próximas seções.

Para definirmos o estado inicial do problema, imaginemos o recorte de uma superfície de elevação de n x m células, onde cada célula possui elevação $z(n,m)$. A RI (região amarela na Figura 36) é o conjunto de células que se pretende servir, as quais se deseja cobrir, e onde provavelmente para tal é necessário que os transmissores que proverão essa cobertura estejam nela contidos ou em suas proximidades. A Figura 36 e a sua vista superior (Figura 37) ilustram a RI em amarelo contida na superfície de elevação (conjunto das regiões azul e amarela). Essas regiões constituem o ambiente de trabalho para o posicionamento das estações que irão constituir a SFN na região que, em conjunto com o posicionamento inicial das estações da SFN, define-se o estado inicial do problema.

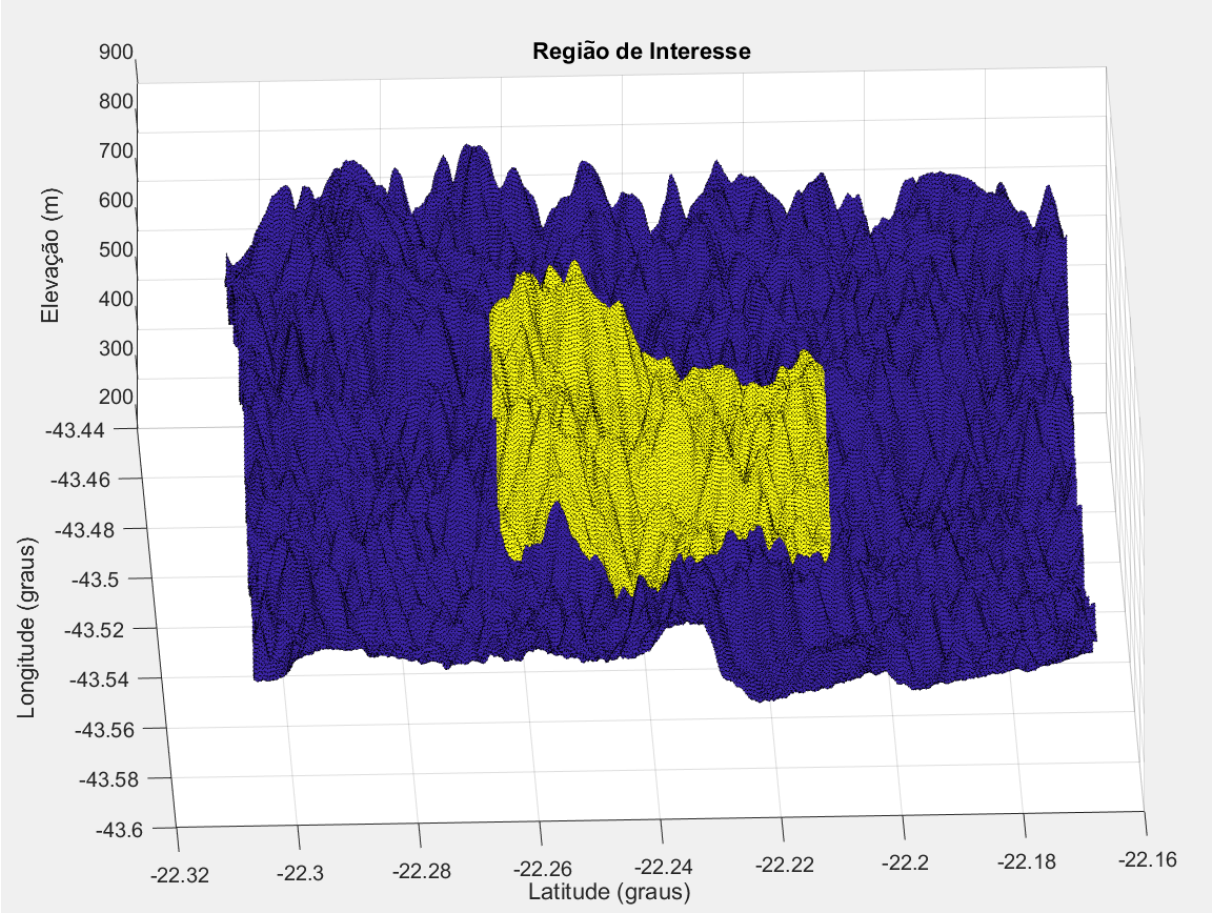

Figura 36 - Exemplo de região de interesse (em amarelo) de 100x100 pixels sobre um relevo de 500x500 pixels.

Consideraremos RIs retangulares por comodidade de implementação, mas nada impede que elas sejam não retangulares, até mesmo côncavas e descontínuas. Na Seção 7.2 será estudado um caso de teste em que a RI tem formato não regular.

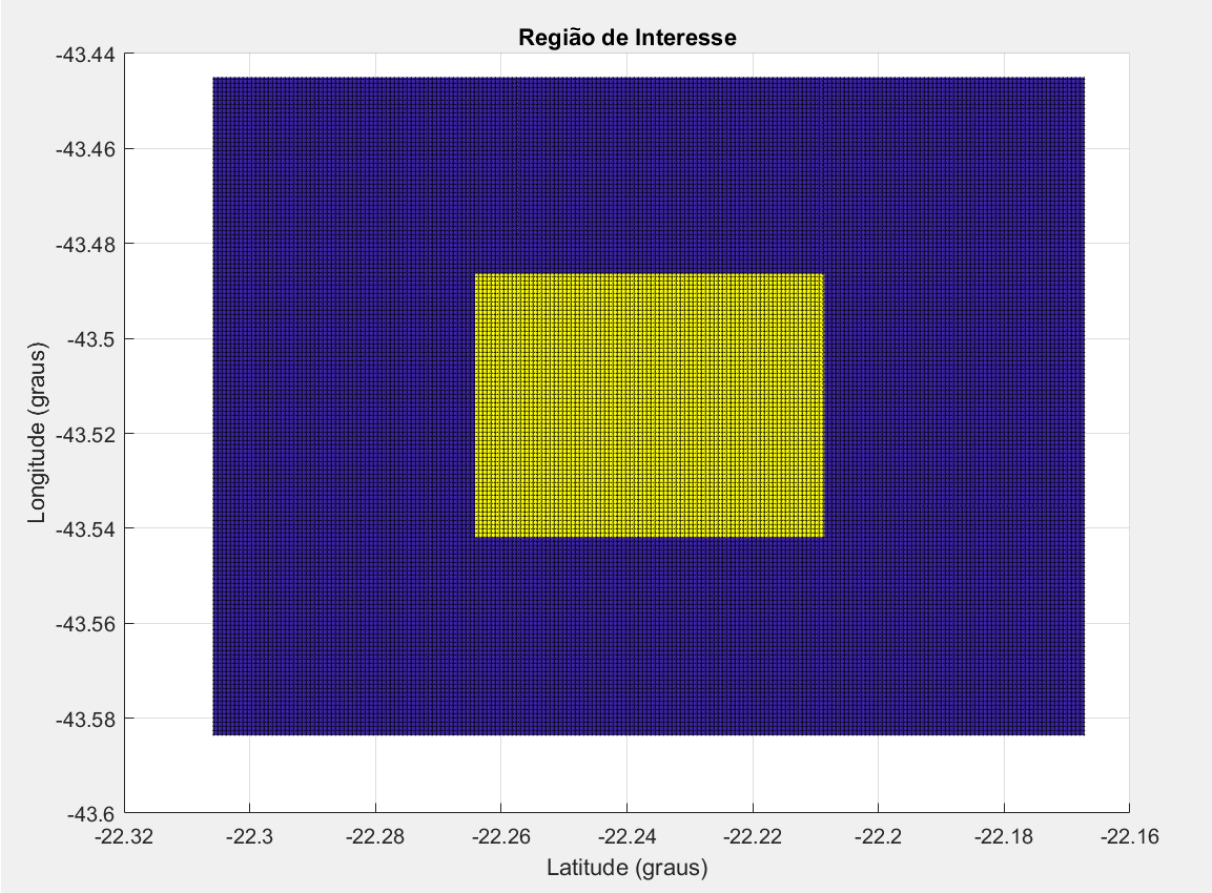

Figura 37 - Vista superior da região de interesse da Figura 36.

Para o atendimento do critério de cobertura mínima e solução do problema, que definimos como um percentual mínimo de células na RI nas quais o campo elétrico ultrapassa o patamar definido pelo projetista, podem ser usados até N transmissores situados em N posições na superfície de elevação. Assume-se para todas as estações a mesma potência de transmissão, antenas isotrópicas, cujos centros de irradiação estão a mesma altura h, que todos os transmissores estão em configuração de SFN (todos operam no mesmo canal e em sincronismo) e operam dentro do limite do intervalo de guarda e a cobertura gerada por cada transmissor nesse relevo é calculada, por exemplo, usando o modelo ITU-R P.1546 otimizado apresentado no Capítulo 2.

6.2 Estratégica Heurística Proposta

Uma célula localizada na RI está coberta pela SFN se dentre os campos elétricos (calculados através da ITU-R P.1546) recebidos das estações transmissoras houver ao menos um que supere o patamar mínimo exigido para recepção. Essa condição é satisfeita se o valor máximo dentre os campos elétricos chegando das diferentes estações é superior ao campo elétrico requerido para recepção, isso é

$$max_{nTx} E_{Rx}(nTx, i, j) \begin{cases} \geq E_{min}, & Cobertura\ de\ i,j\ satisfatória \\ < E_{min}, & Cobertura\ de\ i,j\ não\ satisfatória' \end{cases} \quad (42)$$

onde nTx indica o transmissor, i e j são as coordenadas da célula/ponto, logo $E_{Rx}(nTx, i, j)$ é o módulo do campo elétrico proveniente do transmissor nTx em (i, j) e E_{min} é a mínima intensidade do campo elétrico requerido para a recepção. Analogamente, construímos a matriz de cobertura individual

$$Cobertura(nTx, i, j) = \begin{cases} 1, & se\ max_{nTx} E_{Rx}(nTx, i, j) \geq E_{min} \\ 0 & caso\ contrário \end{cases}, \quad (43)$$

A Figura 38 ilustra a região atendida por um transmissor (mancha de cobertura) em uma região de interesse (neste caso, o município de Queimados) considerando um patamar de recepção de 58 dBμV/m [27].

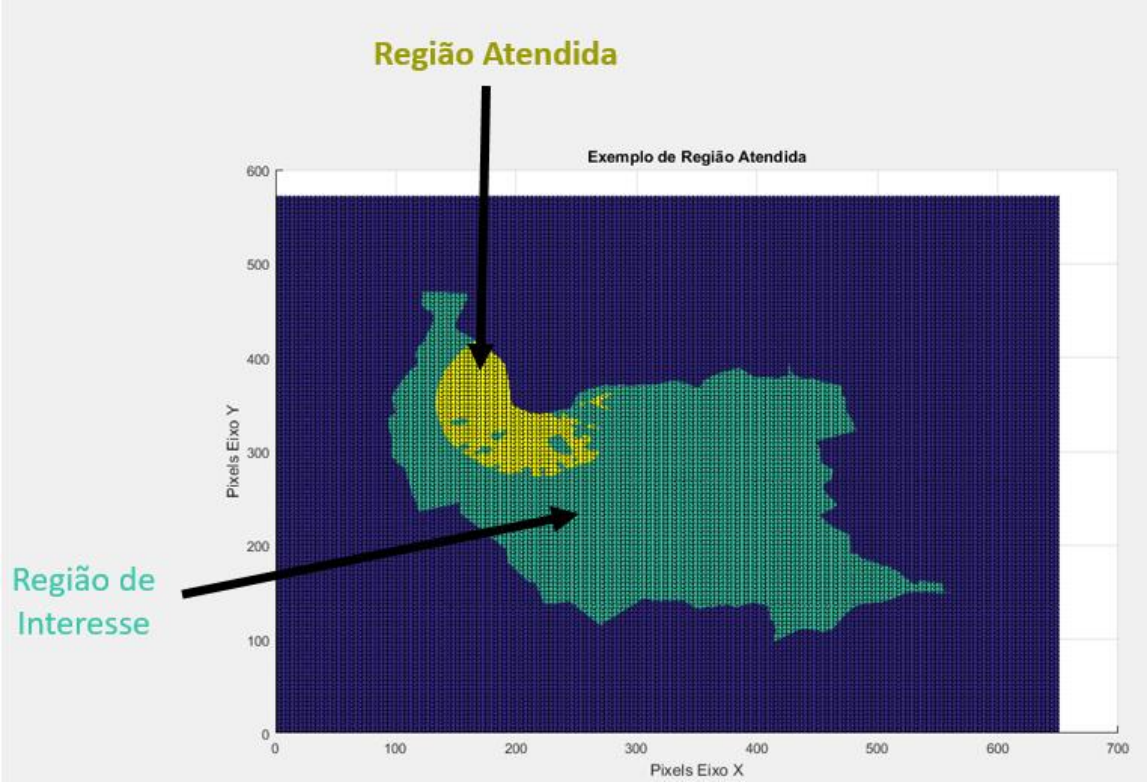

Figura 38 – Cobertura de um transmissor na região de interesse do município de Queimados.

Quando combinadas as coberturas, cada pixel da superfície de elevação é valorado pela soma das superfícies de cobertura de cada estação e assim classifica-se as regiões em coberta, não-coberta e sobreposta

$$Supsc(i,j) = \sum_{nTx=1}^{N} Cobertura(nTx, i, j) + RI(i,j) \quad (44)$$

A Tabela 17 apresenta as diferentes condições dos "*pixels*" em função da variável $\boldsymbol{Supsc}$ de uma região geográfica em função de seu pertencimento à RI e da satisfação da condição de recepção pela SFN. No exemplo da Figura 39 pode-se observar a RI (com valor igual a 1) e regiões cobertas por 1 ou mais transmissores, as regiões cobertas por mais de 1 transmissor consideram-se como regiões de sobreposição de coberturas.

Tabela 17 – Valores utilizados para classificação da cobertura na RI

Supsc(i,j)	**Significado**
0	Não pertence à RI
1	Pertence à RI e não é coberto
≥ 2	Pertence à RI e é coberto por $(Supsc - 1)$ transmissores

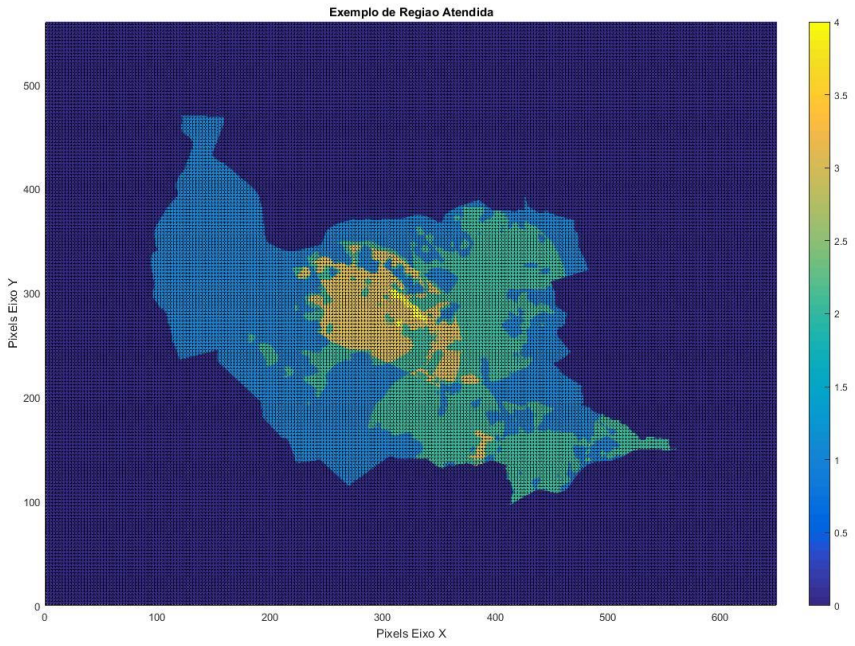

Figura 39 – Exemplo de Região de Interesse e as manchas de coberturas de uma SFN.

Avalia-se o atendimento/cobertura do posição (i, j) em que a superfície $\boldsymbol{Supsc}$ usando

$$Supsc(i,j)\begin{cases}\geq 2 \\ < 2\end{cases} \quad \begin{matrix} coberto\ em\ i,j \\ não\ coberto\ em\ i,j\end{matrix}, \tag{45}$$

e analogamente construímos a superfície de validação da cobertura conjunta das coberturas individuais da SFN com

$$CoberturaConjunta(i,j,t) = \begin{cases} 1 & Supsc(i,j,t) \geq 2 \\ 0 & caso\ contrário \end{cases}. \quad (46)$$

Podemos assim definir na RI a cobertura, não-cobertura e sobreposição pixel a pixel.

Neste trabalho, propõe-se e desenvolve-se um algoritmo que otimiza o posicionamento de N estações transmissoras para o melhor atendimento da RI empregando uma heurística de otimização que considera alguns fatores de projeto relevantes para a transmissão na faixa de UHF. Os fatores considerados são a distância das estações do centroide da RI, elevação do relevo da região e seus máximos, a região ainda não coberta pelas demais estações transmissoras e indesejadas sobreposições entre as coberturas. Todos esses fatores serão estudados separadamente nas seções 6.2.1 até 6.2.5.

Esses fatores são empregados para gerar superfícies que indicam adequação/aptidão para o atendimento da RI derivada de posicionar uma antena num dado ponto da região geográfica e que conjugadas com a superfície de cobertura permitem movimentar as estações transmissoras e encontrar um conjunto de posições para as estações que forneça uma cobertura melhor, otimizando a cobertura provida pelas antenas da SFN.

A Figura 40 ilustra o abordagem heurística adotada para a busca por posições para as estações SFN que atendam o critério de cobertura. Dividimos este modelo em 3 partes: estado inicial, que é composto pelas variáveis de entrada utilizadas na busca, modelo de transição ou estratégia heurística, formada pelo conjunto de superfícies calculadas a cada estado que irá determinar as posições candidatas do próximo estado através das Equação (47) e Equação (48) e que, caso o conjunto atenda o Critério Solução determinado pelas variáveis de entrada, irá armazenar o conjunto de posições escolhidas (i,j) no terceiro bloco, o conjunto de soluções.

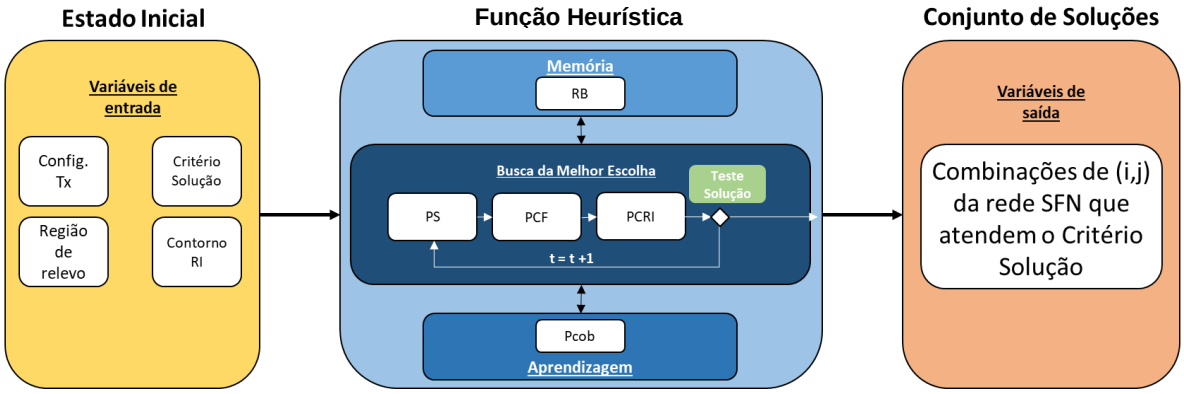

Figura 40 – Diagrama de blocos do método heurístico utilizado para a resolução do problema do atendimento da cobertura de uma região.

Esse modelo combina estratégias de simplificação do problema, ou abstracionais, a modelos de aprendizagem e também à memória recursiva de curto prazo de forma a estimar caminhos de soluções de menor custo em uma tentativa de obter o Conjunto Solução da maneira menos custosa possível [15].

A função heurística de busca pelos pontos onde posicionar o transmissor nTx considera o próximo candidato como melhor se

$$\left(i^*(nTx), j^*(nTx)\right) = \arg max_{i,j \in Z}\, Cand(nTx, i, j, t) + \mathcal{N}(v, \sigma^2) \tag{47}$$

onde t é a iteração, e

$$\begin{aligned} Cand(nTx, i, j, t) = \{&Pcob(nTx, i, j, t) \cdot RB(nTx, i, j, t) \\ &\cdot [k \cdot PS(i, j) + \alpha \cdot PCF(i, j) + \gamma \cdot PCRI(nTx, i, j, t)]\} \end{aligned} \tag{48}$$

e $\mathcal{N}(v, \sigma)$ é um distribuição normal (Gaussiana) de média v e variância σ^2. Acima, o termo $Pcob(nTx, i, j, t)$ tem relação com a capacidade de cobertura no ponto (i, j). $RB(nTx, i, j, t)$ avalia se o ponto (i, j) pertence à região de busca para o transmissor nTx na iteração t. O termo $PS(i, j)$ avalia a elevação do ponto (i, j) em relação à máxima elevação das células, $PCF(i, j)$ valora cada ponto (i, j) em função da sua distância média aos pontos mais altos fora da RI e $PCRI(nTx, i, j, t)$ avalia a proximidade média do transmissor nTx das regiões dentro da RI não cobertas mais próximas. Para ponderar as diversas superfícies, são utilizados os pesos $(k, \alpha, \gamma$ na

Equação (48)). A abstração da busca ao utilizar essas superfícies é possível pelo conhecimento prévio dos aspectos do problema que é a cobertura de regiões utilizando redes SFN. O desenvolvimento dessas superfícies e seus pesos serão mostrados nas próximas seções.

A chamada função heurística, fruto da utilização em conjunto da Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Equação (48) é usada aqui para uma busca de melhor escolha, onde usa estas equações diretamente a estimar o menor custo para a solução e assume-se que assim pode-se conduzir a uma solução mais rapidamente que uma busca [15].

6.2.1 Cobertura na RI

A não cobertura de regiões da RI deve atrair estações transmissoras próximas aos centroides dessas regiões com o intuito de ao se aproximar dessas regiões, passar a atender as mesmas. A Figura 41 mostra os máximos regionais calculados a partir de uma superfície de elevação e as células de Voronoi geradas a partir desses centroides. Dessa forma, conseguimos segmentar o relevo possibilitando análise simplificada.

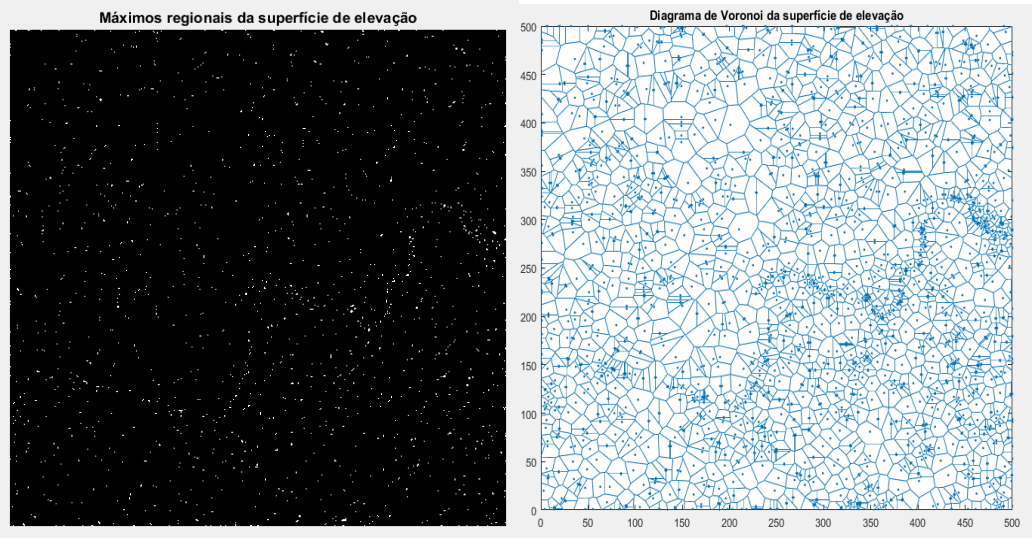

Figura 41 – Superfície de Voronoi (esquerda) gerada a partir dos máximos regionais (direita) da superfície de elevação.

Os máximos regionais são usados como centroides para obter as células de Voronoi e a cobertura ou não-cobertura desses máximos é um fator crucial para o cálculo do que chamamos de superfície de aproximação. Máximo regional é uma célula ou conjunto de células em região conectada de pixels formada a partir de uma célula que contém valor maior ou igual ao maior valor dessa região [52].

A superfície de aproximação de cada estação transmissora é gerada a partir do somatório das superfícies de aproximação individuais de cada centroide mais próximo da mesma. Para cada um dos centroides escolhe-se a estação mais próxima, conforme ilustrado na Figura 42. Essa condição é atendida quando:

$$c_{Tx} = \mathrm{c}|\{agr\ min_c(d(\mathrm{nTx}, c))\}, \tag{49}$$

onde c_{Tx} é o centroide mais próximo da estação nTx e $d(nTx, c)$ é a distância entre um dos C centroides e uma das nTx estações. Os centroides efetivamente considerados nesse cálculo são uma fração p, os mais elevados dentre os máximos regionais:

$$\boldsymbol{c}_{i,j} \in C_{RI}\ se\ \boldsymbol{c}_{i,j} = MaxRegionais(\boldsymbol{S}, \boldsymbol{RI}, p). \tag{50}$$

No algoritmo implementado, p varia de 0,2 a 1 em passos de 0,2, cada vez que é executado um número fixo de iterações. Uma superfície de aproximação $\boldsymbol{PCentroidesRI}$ na posição (i, j) de um centroide índice c é calculada por:

$$PCentroidesRI(c_{Tx}, nTx, i, j) = log_{10}\left(\frac{\max\left(\overline{d(c_{Tx}, \imath, \jmath)}\right)}{d(c_{Tx}, i, j)}\right), \tag{51}$$

onde nTx é o índice do transmissor mais próximo da posição do centroide c_{Tx}. A distância entre um ponto (i, j) e um centroide c é dada por

$$d(c_{Tx}, i, j) = \sqrt{(XUTM(i,j) - XUTM(c))^2 + (YUTM(i,j) - YUTM(c))^2}, \tag{52}$$

onde $XUTM(i, j)$ e $YUTM(i, j)$ são as coordenadas no sistema UTM da célula (i, j) localizada na superfície de elevação. Após calculadas as superfícies de aproximação

dos centroides para cada estação transmissora calcula-se a média usando como denominador $NCentroides$, que corresponde à quantidade de centroides que atendem a condição da Equação (49) na iteração t, definindo assim a superfície que pondera os centroides dentro da RI,

$$PCRI(nTx, i, j, t) = log_{10}\left(\frac{\sum_{n=1}^{NCentroides} PCentroidesRI(c, n, i, j, t)}{NCentroides(nTx, t)}\right) \quad (53)$$

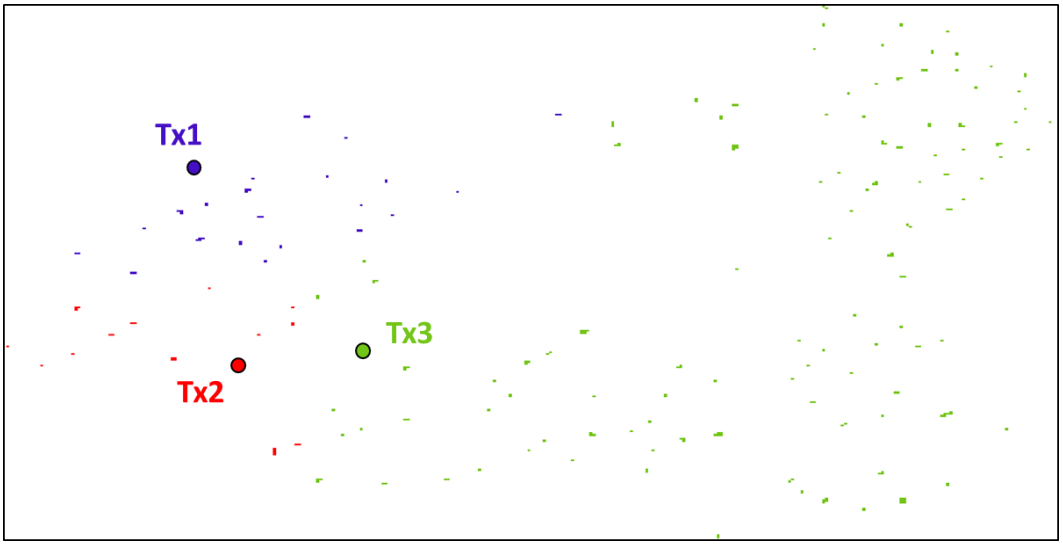

Figura 42 – Transmissores e seus centroides mais próximos segundo a Equação (49).

Cada centroide em que a condição de cobertura não é atendida é atribuído a uma estação. Assim, consegue-se aproximar regiões não-cobertas das suas estações mais próximas e que resultará em estações melhor distribuídas sobre a superfície, evitando assim superposições quando possível.

A superfície mostrada na Figura 43 exemplifica uma $PCRI$ formada a partir da condição de cobertura e centroides no relevo de teste para uma das estações. Essa superfície é única por estação transmissora e varia a cada iteração conforme elas mudam de posições.

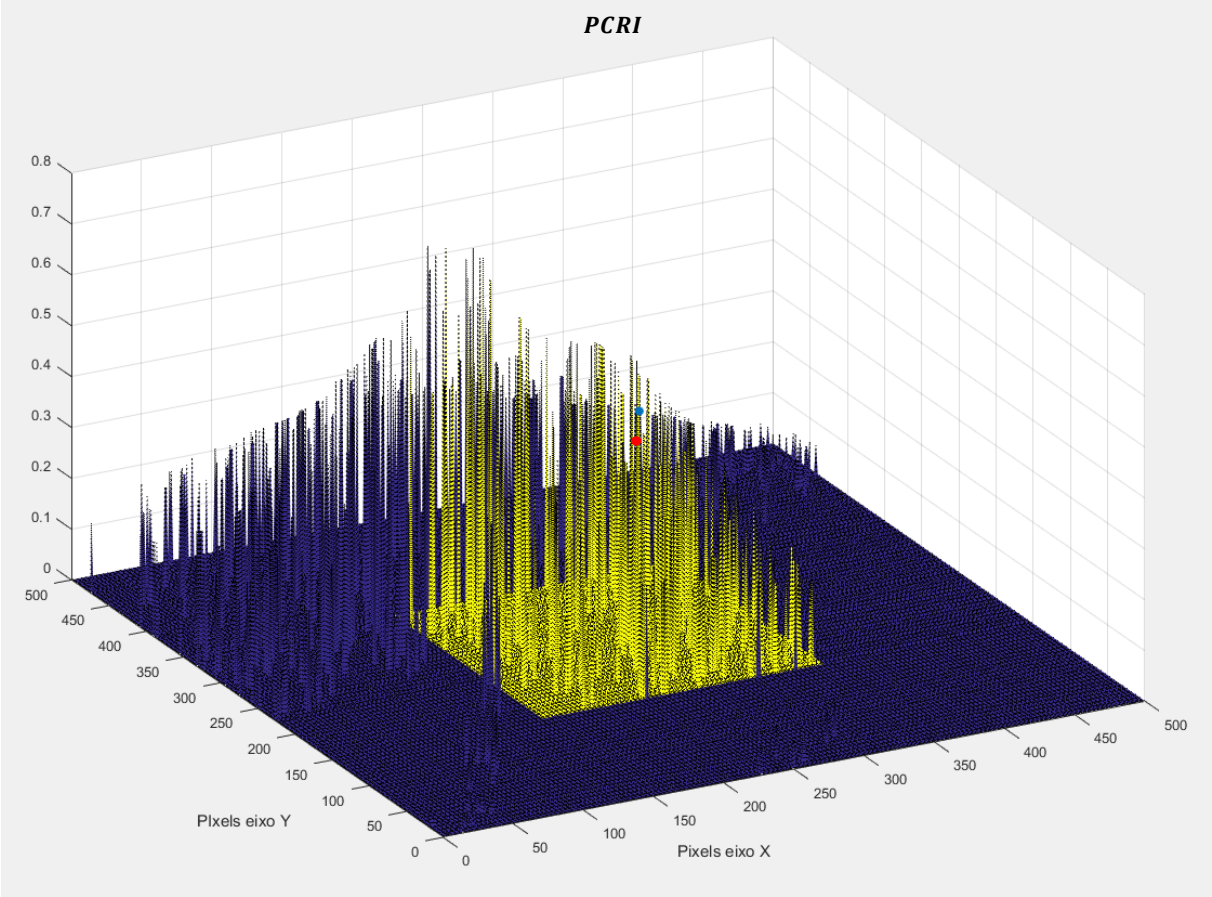

Figura 43 – $\overline{\boldsymbol{PCRI}}$ calculada a partir dors centroides mais próximos ao ponto em vermelho.

A $\boldsymbol{PCRI}$ é muito importante pois ajuda a aproximar as estações para as regiões não cobertas da RI, pois ela é uma medida do espaço não coberto na RI tanto como do potencial de cada estação em atender pontos não cobertos. Essas características combinadas geram uma tendência em do $Cand(nTx, i, j, t)$ favorável a uma melhor distribuição das estações em configuração de SFN.

6.2.2 Elevação

A princípio, antenas posicionadas em maiores alturas têm maior potencial para prover melhor cobertura. A análise das curvas na Figura 44 (ITU-R P.1546) indica que quanto maior a elevação do ponto de transmissão relativamente à média das distâncias ao longo do enlace ponto-a-ponto, menor será a atenuação a uma mesma distância e, consequentemente, maior será a área coberta. Assim, deve-se atrair as estações transmissoras para regiões mais elevadas da superfície de elevação $\boldsymbol{S}$.

A superfície de elevação $\boldsymbol{S}$ (Figura 44) é normalizada na Equação (54) formando a superfície

$$PS(i,j) = \left(\frac{log_{10}(S(i,j))}{\max_{i,j} log_{10}(S(i,j))} \right), \tag{54}$$

que é utilizada no cálculo dos candidatos durante o processo de movimentação das estações transmissoras.

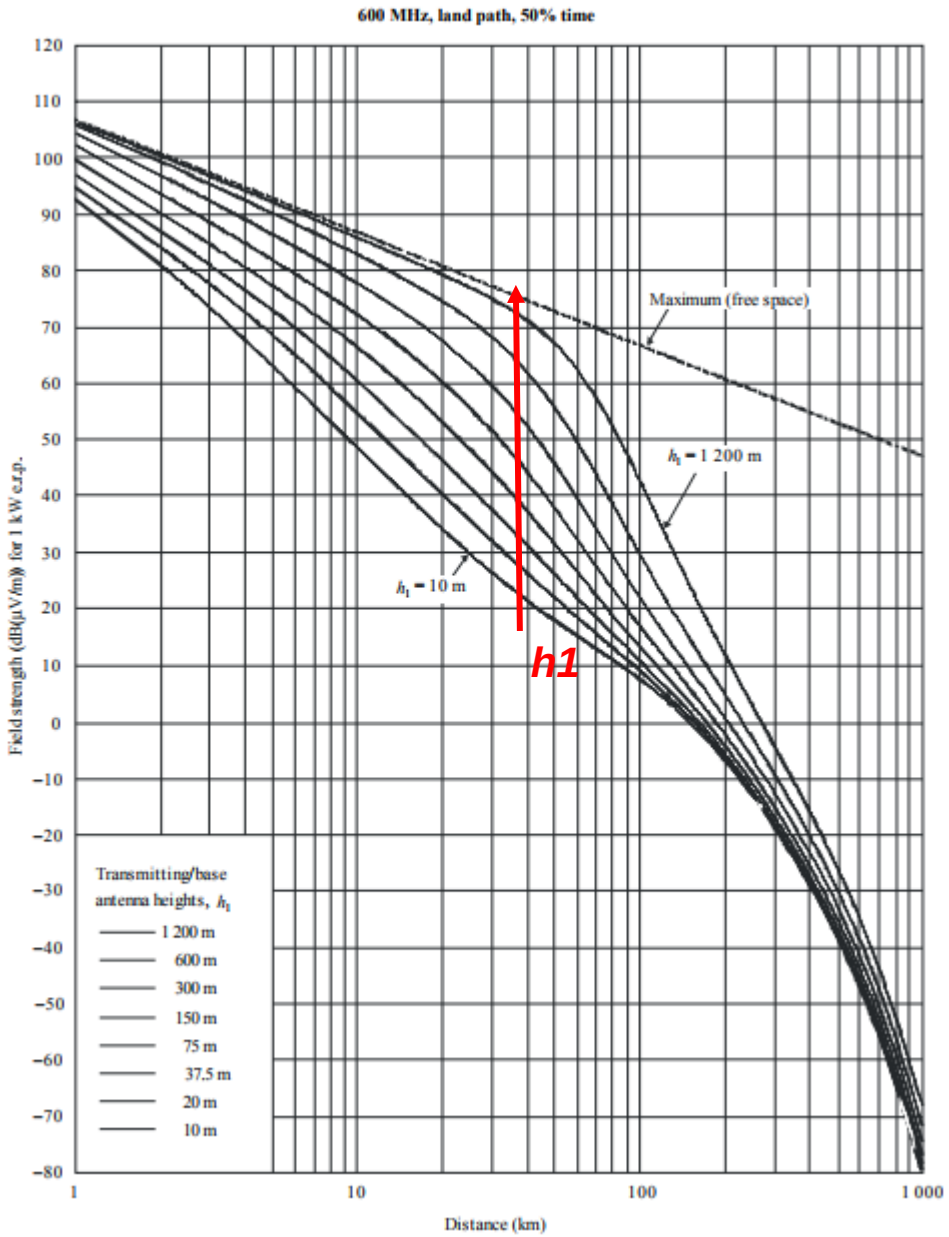

Figura 44 – As curvas da ITU-R P.1546 tem maiores valores de campo para maiores valores da estação transmissora (h_1).

Observa-se que usando tal definição, $\boldsymbol{PS}$ é mapeado no intervalo (0,1].

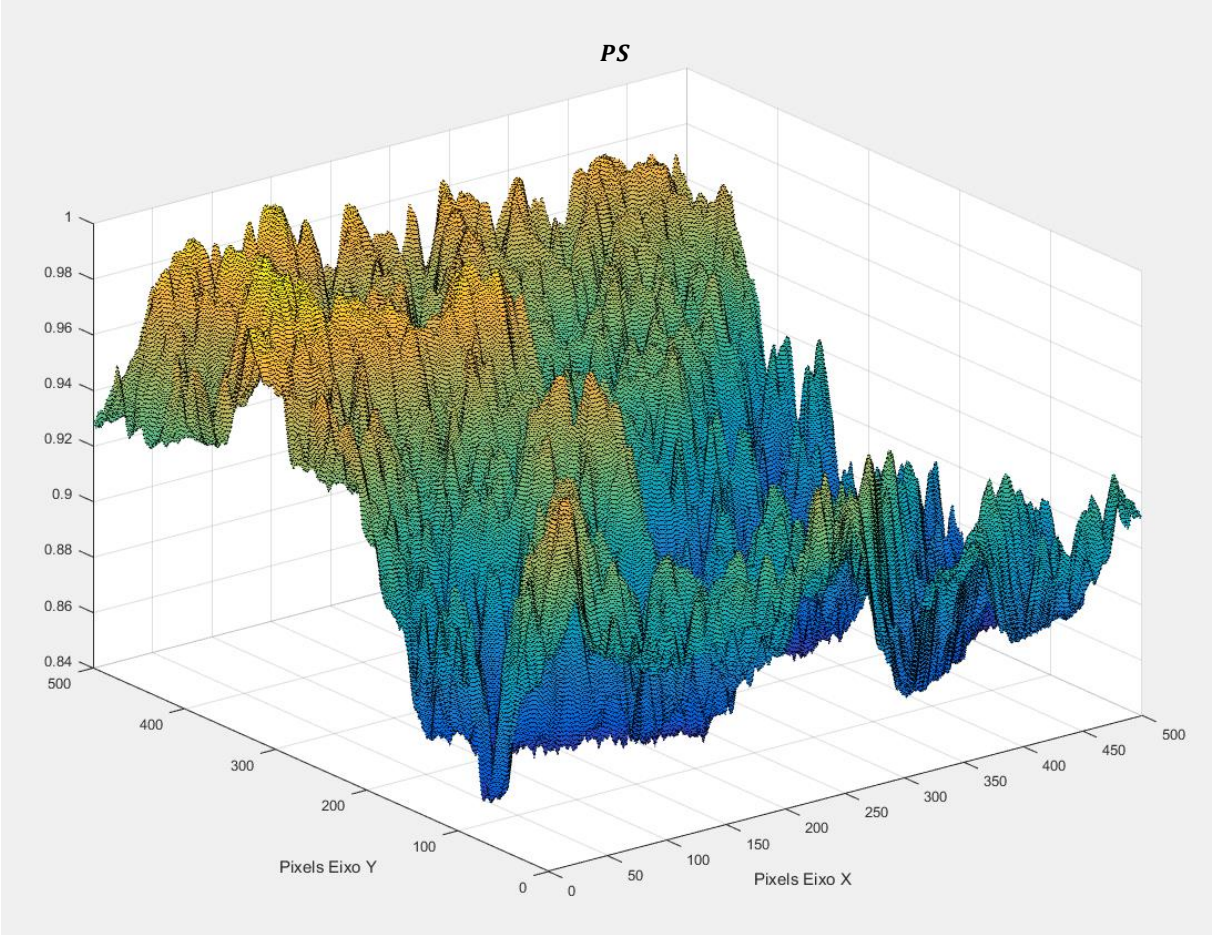

Figura 45 – $\boldsymbol{PS}$ calculado da superfície de elevação de teste.

Na Equação (54), o logaritmo é usado para suavizar a superfície de relevo além de fazer com que $\boldsymbol{PS}$ seja mapeado no intervalo (0,1]. Assim, $\boldsymbol{PS}$ insere um termo de penalização aos pontos candidatos para os transmissores. Esta penalização aumenta quanto menor é a elevação do ponto.

6.2.3 Centroides fora da RI

A atração das estações para os centroides da superfície de Voronoi (Figura 41) localizados no exterior da RI foi pensada para diversificar a maneira com que as estações transmissoras se movimentam entre os pontos de relevo, fazendo com que o seu caminho percorra além da RI, pontos em seus arredores, potencialmente adequados para cobrir a RI. A superfície $\boldsymbol{PCF}$ representa o peso dos centroides fora da RI mais elevados e é utilizada de forma a possibilitar uma maior variação na

forma com que os candidatos de cada estação, ao serem iterados, se aproximam da RI evitando a alta densidade deles dentro da RI e, ao mesmo tempo, também serve para guiar a movimentação desses candidatos para áreas mais próximas à RI quando as mesmas estão em uma condição de não cobertura de nenhuma célula. Isso é possível dada a variação da variável α, que possui valor mais alto na condição de não cobertura e, mais baixo, caso contrário. A parte dos centroides das superfícies de Voronoi que serão utilizados são escolhidos segundo a seguinte classificação: são o subconjunto formado pelos 30% mais elevados e que não pertencem à RI. A Figura 46 mostra um exemplo dessa classificação, gerada a partir do relevo da Figura 36. Essa classificação garante que os pontos mais elevados fora da RI possam vir a ser testados como candidatos, aumentando o alcance da busca.

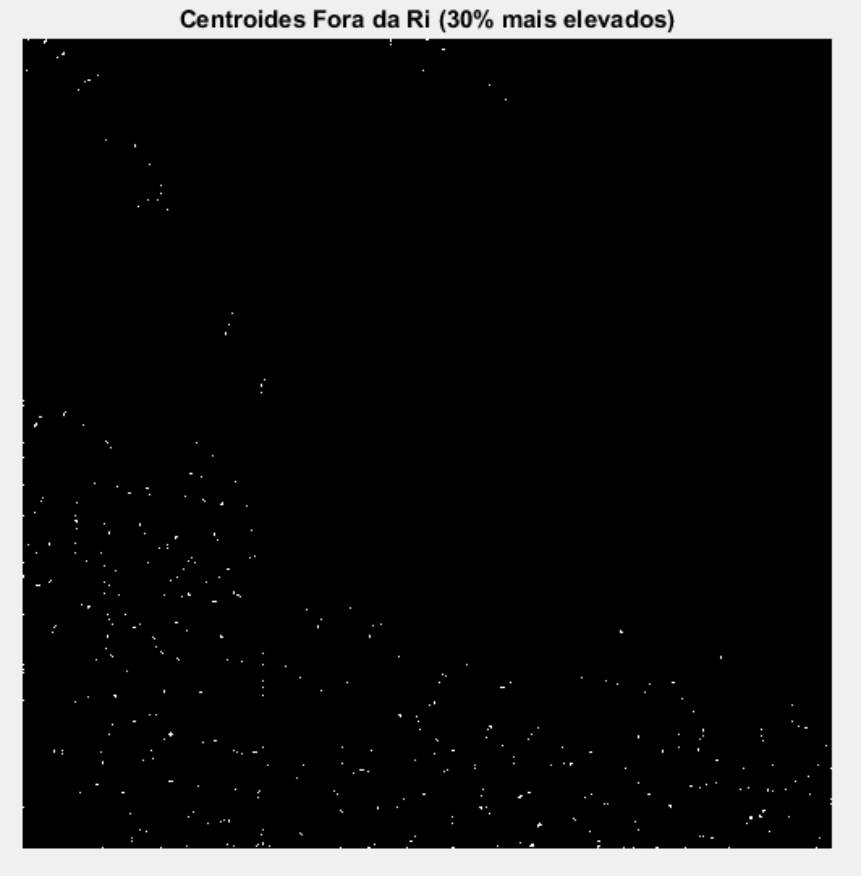

Figura 46 – Exemplo dos 30% pontos mais elevados dos centroides fora da RI.

A superfície gerada é calculada de forma similar a superfície de aproximação na Equação (52). Valora-se cada célula em uma posição (i, j) em função da sua distância de um centroide localizado fora da RI (cf) usando

$$d(cf,i,j) = \sqrt{(XUTM(cf) - XUTM(i,j))^2 + (YUTM(cf) - YUTM(i,j))^2}. \quad (55)$$

Assim, um centroide cf é considerado como fora da RI se

$$cf_{i,j} \in C_{\neg RI} \; se \; c_{i,j} = MaxRegionais(\boldsymbol{S}, \neg \boldsymbol{RI}, pf), \quad (56)$$

onde pf é um fração dos máximos regionais que vale 0,3.

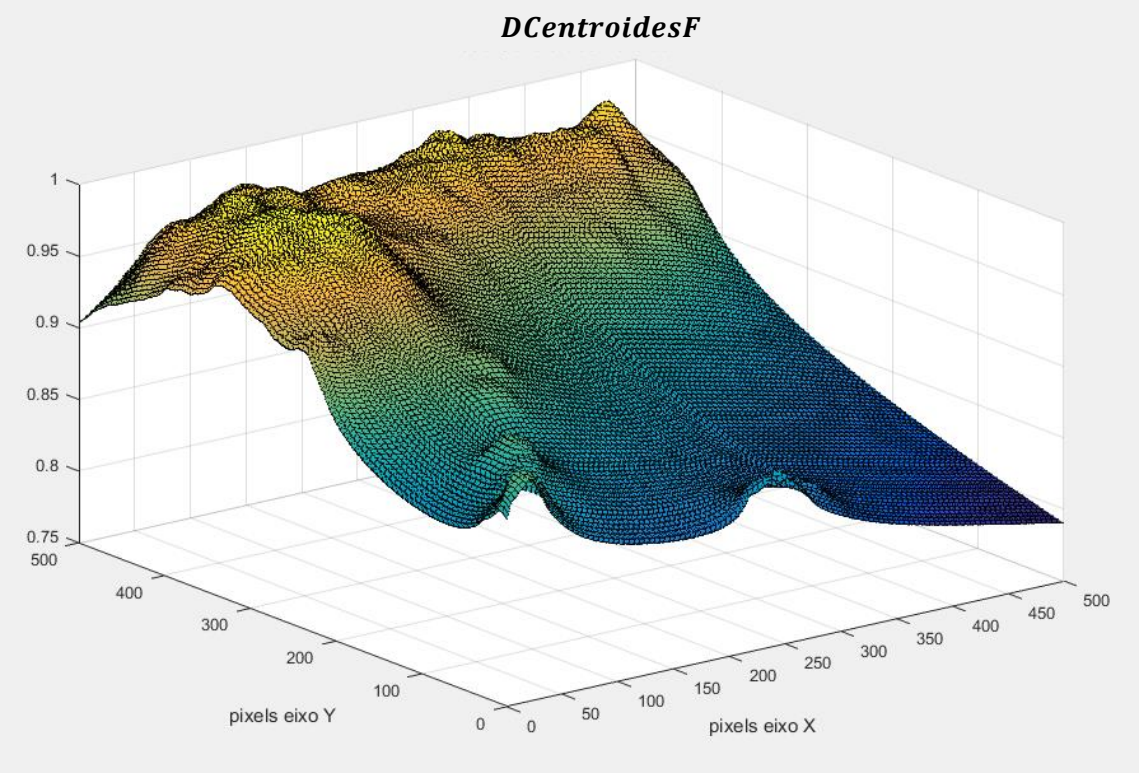

Figura 47 – Exemplo de $\boldsymbol{DCentroidesF}$ calculado da superfície de elevação de teste.

Diferentemente do que foi utilizado na seção 6.2.1, neste caso a superfície utilizada é a mesma para todas as estações transmissoras, ou seja, não é necessário determinar os centroides mais próximos de cada estação. A superfície formada será composta pela soma normalizada $\boldsymbol{d}$ (ilustrada na Figura 47**)** em cf, calculada na Equação (55). Ela é obtida via

$$DCentroidesF(cf,i,j) = \frac{\sum_{cf=1}^{NCentroidesF} d(cf,i,j)}{NCentroidesF(cf)}, \quad (57)$$

onde $\boldsymbol{NCentroidesF}$ é a quantidade de centroides que atendem à condição da Equação (56).

Calcula-se outra superfície de aproximação $\boldsymbol{DCentroideRI}$, gerada exclusivamente a partir do centroide c_{RI}

$$d(c_{RI},i,j) = \sqrt{(XUTM(c_{RI}) - XUTM(i,j))^2 + (YUTM(c_{RI}) - YUTM(i,j))^2}, \quad (58)$$

calculado a partir da geometria da RI (ilustrada na Figura 48), ilustrada na Figura 49.

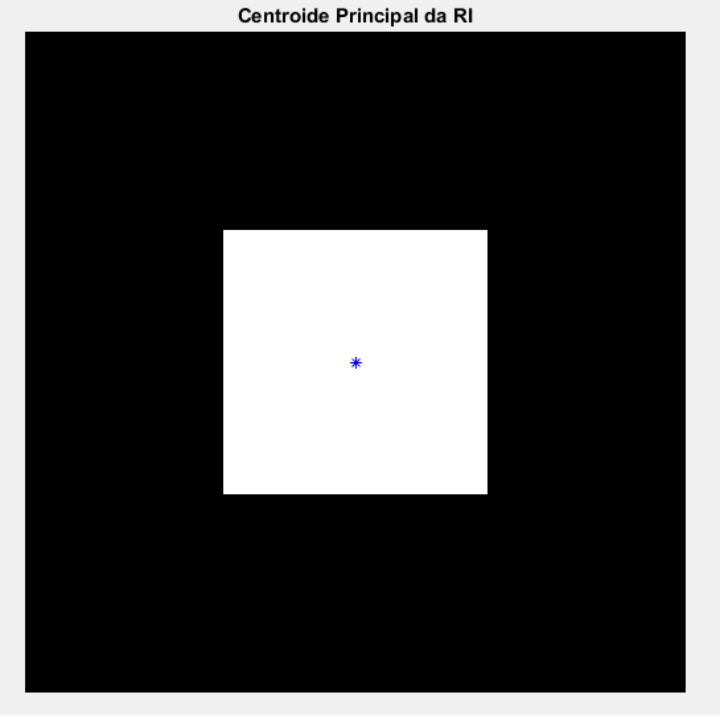

Figura 48 – Exemplo de RI em branco e seu centroide cf calculado (ponto azul).

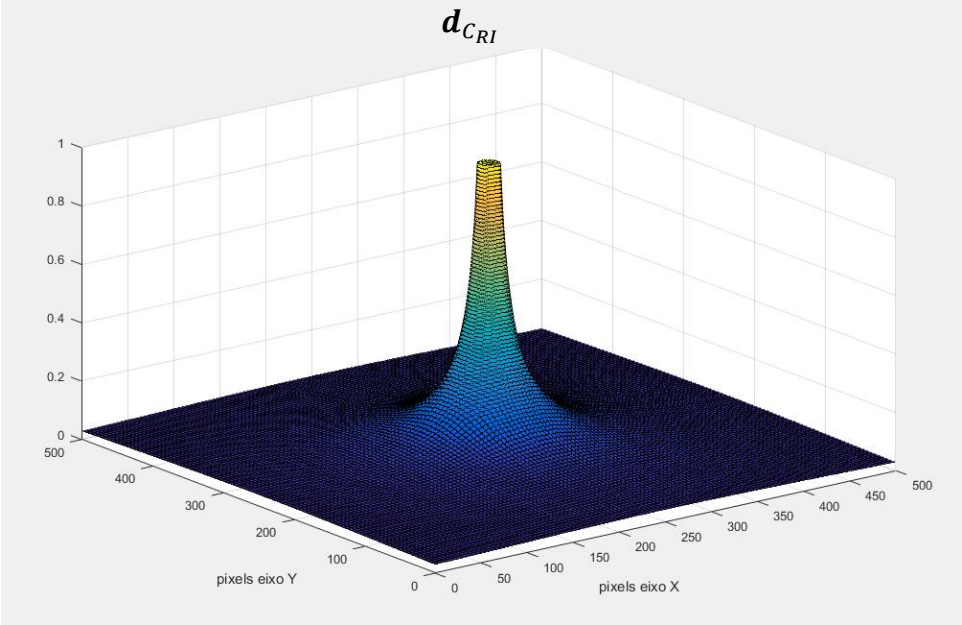

Figura 49 – Superfície de aproximação do centroide dada a geometria da RI.

Utilizando a Equação (59), somamos as superfícies $\boldsymbol{DCentroidesF}$ e $\boldsymbol{d}$ resultando na superfície $\boldsymbol{PCF}$ ilustrado aqui na Figura 50.

$$PCF(cf, c_{RI}, i, j) = DCentroidesF(cf, i, j) + d(c_{RI}, i, j) \quad (59)$$

A superfície $\boldsymbol{PCF}$ é muito importante para a execução do método, pois através da sua utilização na Equação (48), quando combinada com o restante das superfícies da equação, consegue-se equilibrar a maneira com que as estações se movimentam em direção à RI, ao mesmo tempo que também consegue movimentá-las ao seu redor de forma a tornar a busca mais variada.

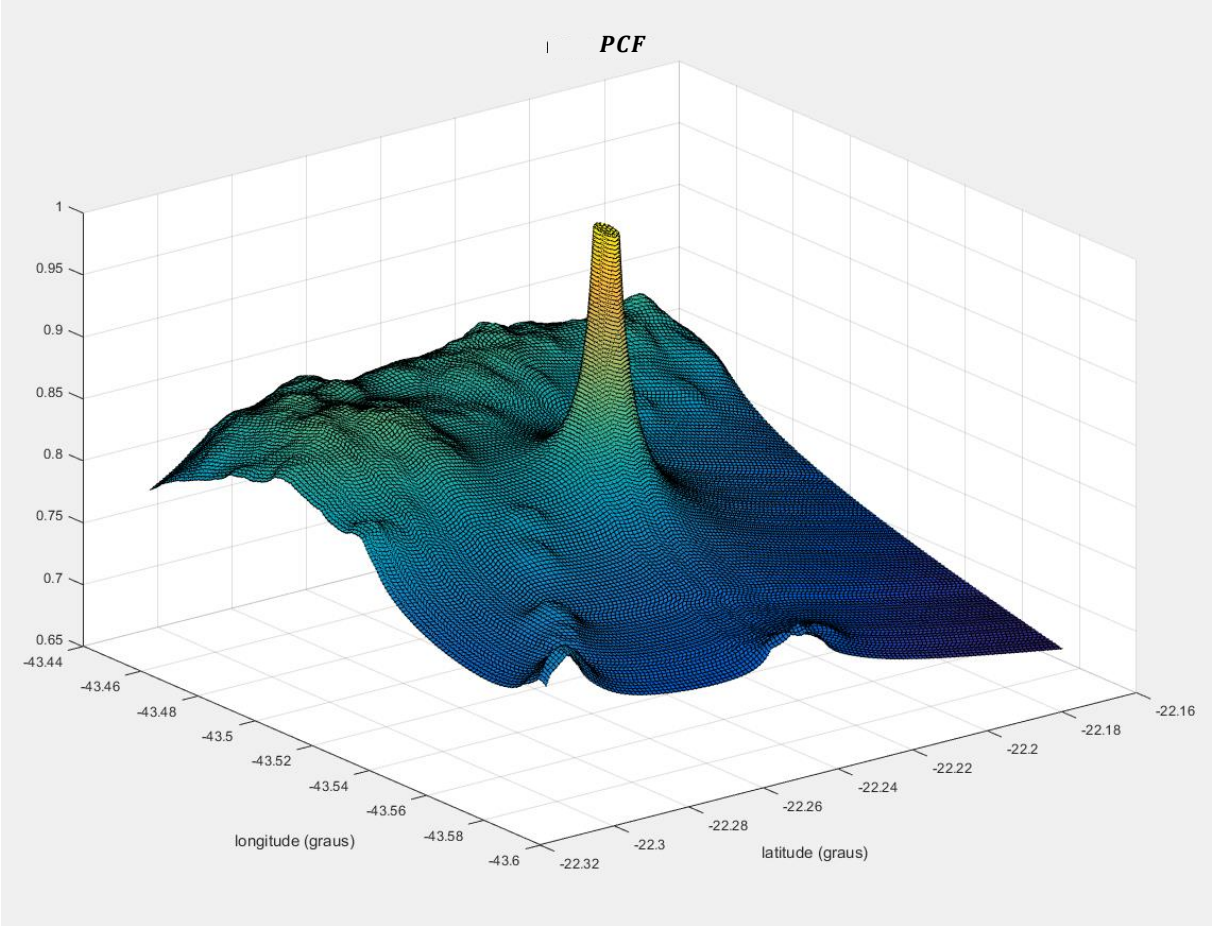

Figura 50 – Superfície formada pela soma normalizada entre as superfícies da Figura 47 e Figura 49.

6.2.4 PCob

Esta superfície é utilizada como uma estratégia de aprendizagem em um nível meta (interno ao programa), interferindo no espaço de estados objetivo (possíveis caminhos para a solução) de forma a minimizar o custo total da solução do problema [15]. Tem o intuito de evitar que o método teste desnecessariamente pontos pouco promissores, que comprovadamente já geraram em iterações anteriores resultados de cobertura individuais inferiores se comparados ao histórico, como também de aumentar a probabilidade de pontos que geraram coberturas individuais comprovadamente melhores do que parte do histórico serem testados novamente em outras combinações com as demais estações. Essa superfície valora pontos testados como candidatos o posicionamento de estações em iterações anteriores do

algoritmo, com o critério da fração de cobertura da RI. Esta superfície é inicialmente o valor um em todos os pontos e, a cada iteração, o ponto testado por uma estação transmissora é valorado como a fração de pontos cobertos na RI,

$$PCoberturaPntN(i_{nTx}, j_{nTx}) = \frac{\sum_i \sum_j Cobertura(nTx, i, j)}{\#RI}. \quad (60)$$

E, a cada iteração a matriz $\boldsymbol{PCob}$ é atualizada na coordenada do transmissor (i_{nTx}, j_{nTx}) com o valor de $PCoberturaPntN(i_{nTx}, j_{nTx})$ normalizado a cada iteração,

$$\mathrm{PCob}(i_{nTx}, j_{nTx}) = \begin{cases} 0{,}01 & \text{se } PCoberturaPntN(i_{nTx}, j_{nTx}) \leq 0{,}01 \\ \dfrac{PCoberturaPntN(i_{nTx}, j_{nTx})}{\max(PCob(i,j))} & c.c \end{cases} \quad (61)$$

Dessa forma, pontos ainda não testados possuem maior valor, o que implica maior probabilidade de serem testados em interações seguintes e pontos que não provêm cobertura de uma área significativa da RI ainda têm a possibilidade de serem selecionados como candidatos para o posicionamento de estações transmissoras. Conforme o número de iterações aumenta, mais pontos de $\boldsymbol{PCob}$ são valorados e a busca passa a ser cada vez mais seletiva em função e suas viabilidades em prover coberturas razoáveis. A superfície apresentada na Figura 51 e Figura 52 mostra o resultado após a execução do método.

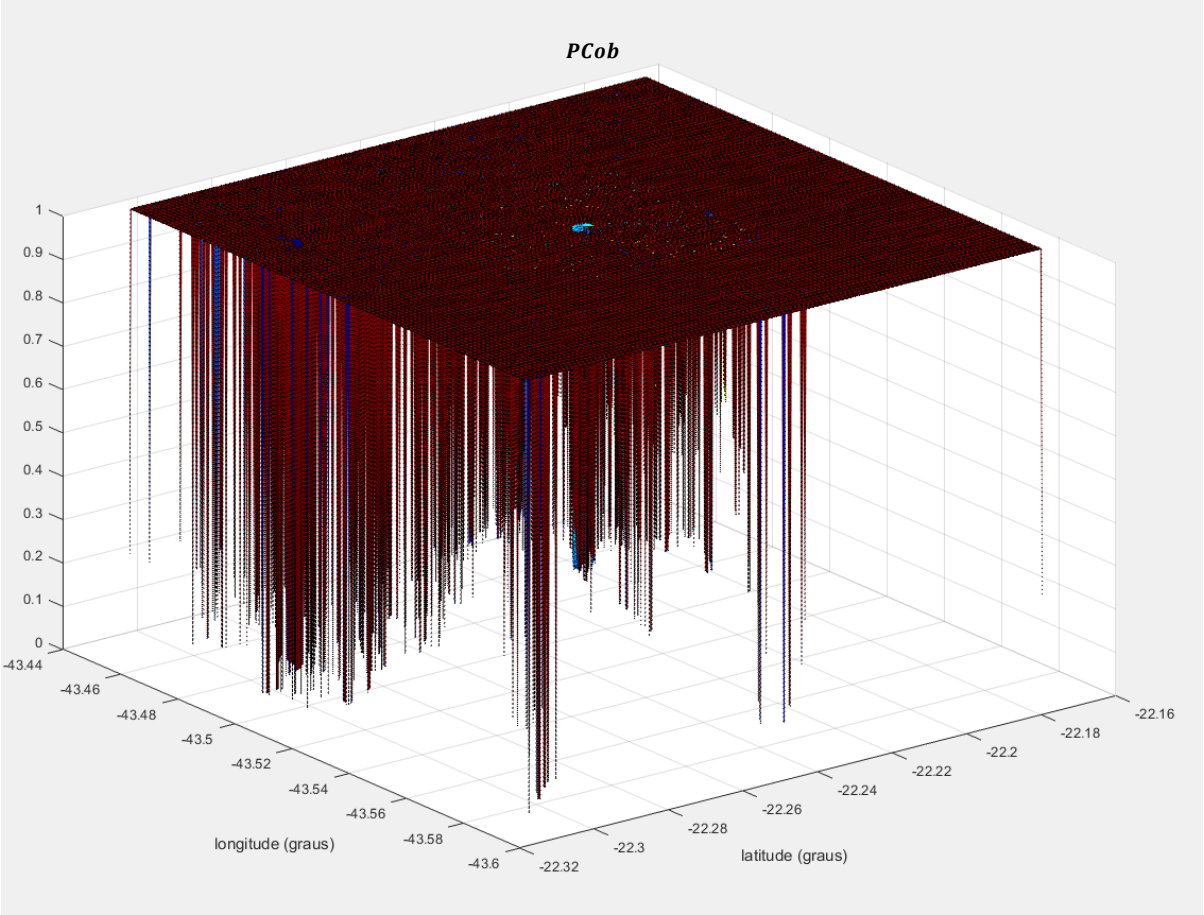

Figura 51 – Exemplo de superfície $\boldsymbol{PCob}$ após 1250 iterações no relevo de teste.

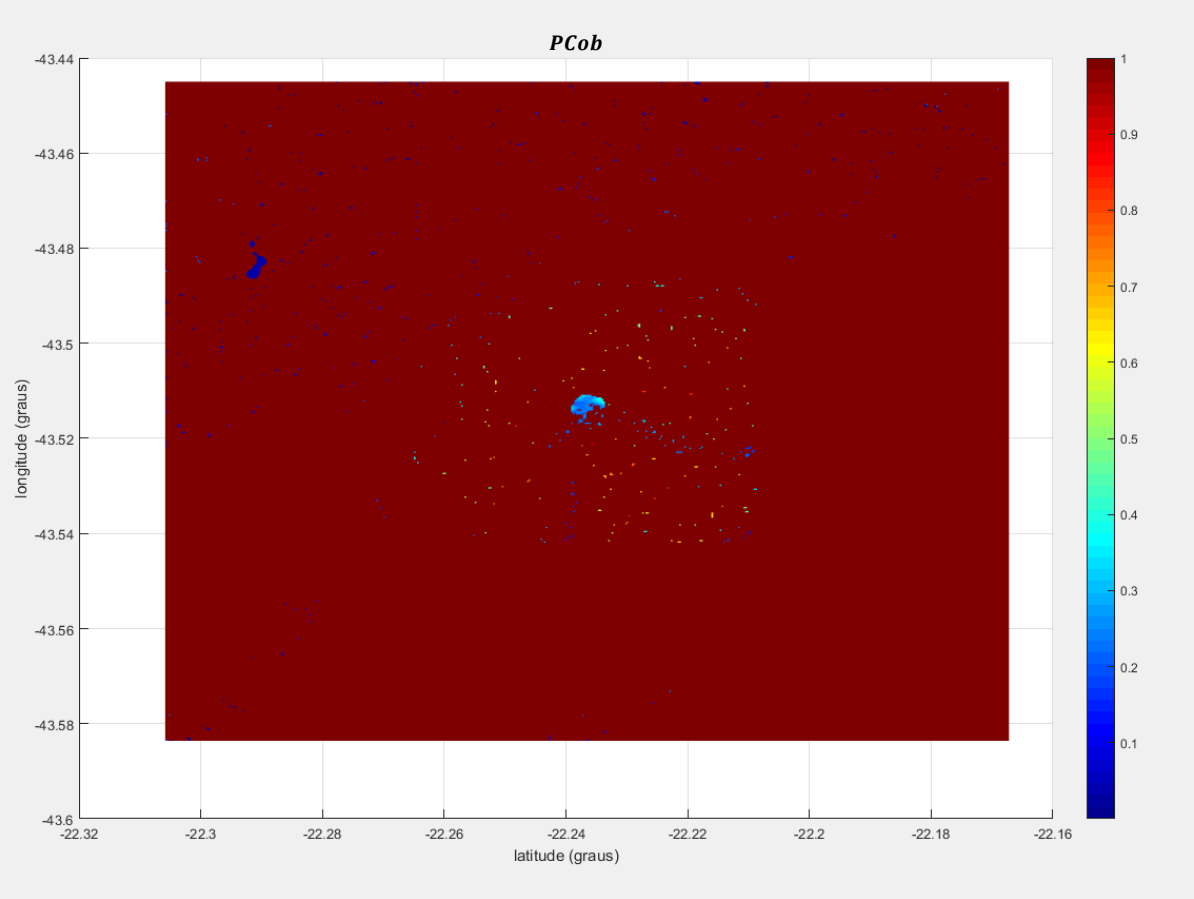

Figura 52 – Exemplo de classificação no plano de $\boldsymbol{PCob}$ após 1250 iterações do algoritmo.

Pode-se observar na Figura 51 os pontos (i, j) testados e os valores atribuídos a eles após a execução do método e observa-se que esses valores variam em (0,1], pontos não testados são inicialmente valorados com o valor unitário, o que funciona como um incentivo para que o método teste novos pontos. Essa superfície tem o papel de sugestionar ao método os pontos mais propensos na ordem: pontos não testados, primeiramente, melhores pontos, segundamente e piores pontos que devem ser evitados.

6.2.5 Região de Busca

Os espaços de estados do problema, que é o conjunto de estados acessíveis (os centroides de Voronoi ou máximos regionais), pode ser tratado separadamente por iteração alterando-se a partir de cada estado atual com a variação da Região de Busca de maneira recursiva, para isso avalia-se a efetividade da função heurística

na iteração atual dado a anterior e constituindo assim uma memória de curto prazo ao algoritmo [15]. A cada iteração da otimização, uma estação pode se deslocar pela região de modo a buscar combinações de posições que atendam a condição de cobertura de maneira eficiente. O raio de movimentação ($Raio(nTx,t)$ na Figura 53) determina o deslocamento máximo a partir do ponto (i,j) de uma estação nTx em que a busca na iteração t da posição candidata para teste na iteração $t+1$ ocorrerá.

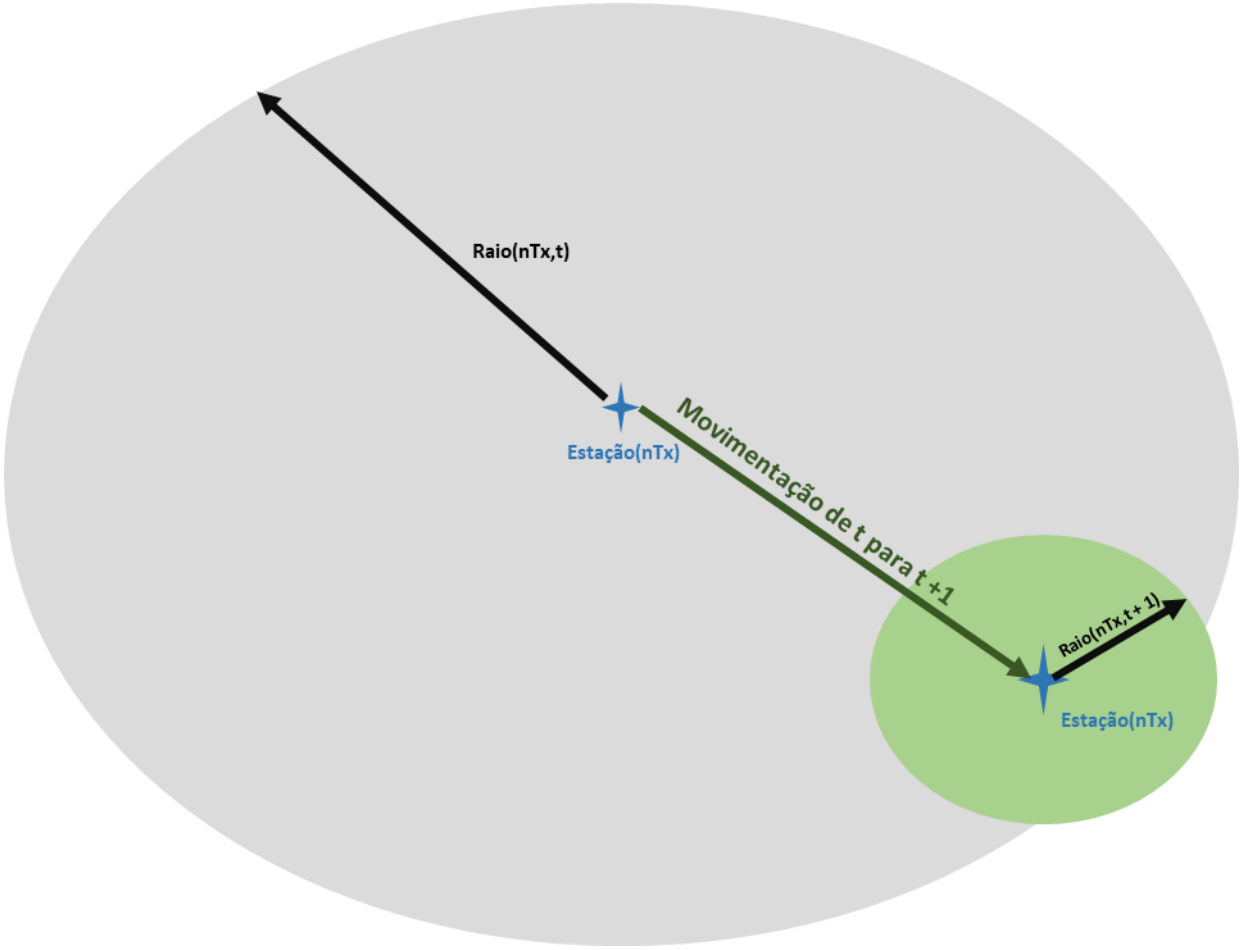

Figura 53 – Exemplo da alteração de $\boldsymbol{Raio}$ conforme a estação transmissora se movimenta.

Parte-se de um raio mínimo inicial de tamanho igual ao diâmetro da célula de relevo, que é quadrada (por exemplo: uma célula de 30 m x 30 m determina um diâmetro mínimo de aproximadamente 42,4 m) e que pode atingir valores de até metade do diâmetro do relevo. Ele sofre um incremento ou decremento de tamanho a partir da seguinte regra

$$Raio(nTx,t) = \begin{cases} Cobertura(nTx,t) = 0 & Raio(nTx,t-1) * 2. \\ Cobertura(nTx,t) \neq 0 \ \wedge \ Cobertura(nTx,t) \leq \ Cobertura(nTx,t-1), & \\ Cobertura(nTx,t) \neq 0 \ \wedge \ Cobertura(nTx,t) > \ Cobertura(nTx,t-1), & Raio(nTx,t)/2 \end{cases} \quad (62)$$

Isso garante que uma estação transmissora se afaste do atual ponto de teste rapidamente caso a sua cobertura na iteração $t+1$ tenha diminuído em relação à obtida na interação t e, caso contrário, garante-se que sejam testados mais pontos na região próxima.

A região de busca $\boldsymbol{RB}$, associada ao raio de movimentação, é gerada para limitar $Raio(nTx,t)$ em uma curva e determina a região do plano para o qual estação nTx pode se mover, de forma a impedir que uma estação transmissora em uma posição (i,j) na iteração t se mova em direção a outras estações transmissoras na iteração $t+1$. A princípio, isso permite explorar melhor a superposição das coberturas das estações consideradas na otimização, visando otimizar a cobertura total. Após o cálculo de $Raio(nTx,t)$, verifica-se se as coberturas de outras estações retransmissoras se sobrepõem a $Cobertura(nTx,t)$ da estação nTx. Em caso afirmativo, as coberturas das duas estações de maiores sobreposições com $Cobertura(nTx,t)$ determinarão o quadrante de $RB(nTx,t)$ conforme ilustrado na Figura 54.

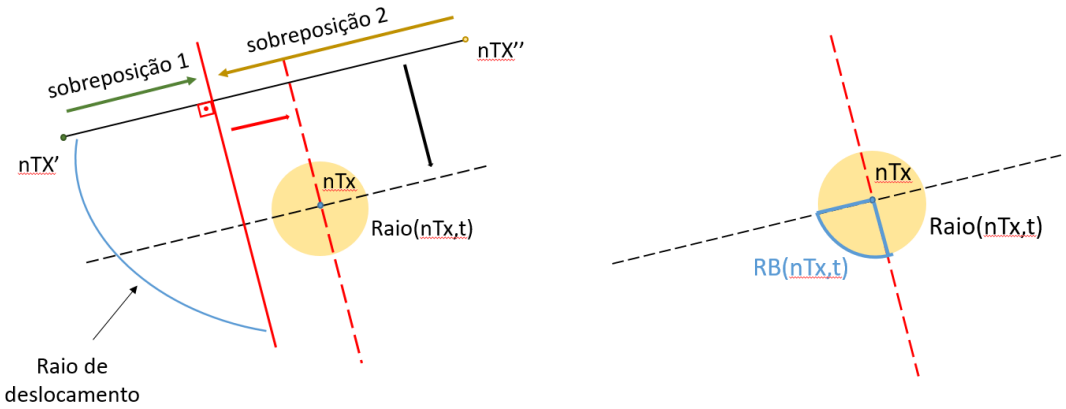

Figura 54 – Definindo a $\boldsymbol{RB}$ através da posição das estações transmissoras que possuem maior sobreposição entre as suas coberturas.

O segmento de reta que une os pontos nTx' e nTx'' da Figura 54 define um dos lados do quadrante de $\boldsymbol{RB}$. O outro eixo é perpendicular a essa reta com interseção, no comprimento da segmento de reta, a partir de nTX', em

$$\frac{Sobreposição_a}{Sobreposição_b} \cdot comprimento\left[\overline{(nTxa, nTxb)}\right], \quad (63)$$

assim, definidas essas retas, o ângulo φ em relação ao eixos $\overrightarrow{Xn}$ e $\overrightarrow{Yn}$ que define $\boldsymbol{RB}$ é dado por

$$\varphi_{RB} = \begin{cases} se\ Sobreposição_a \geq\ Sobreposição_b, & nTxb - 90 \leq \varphi \leq\ nTxb \\ se\ Sobreposição_a <\ Sobreposição_b, & nTxa \leq \varphi \leq\ nTxa + 90' \end{cases} \quad (64)$$

e, podemos definir $\boldsymbol{RB}(nTx, t)$ por

$$RB(nTx, t) = (Raio(nTx, t) | Raio(nTx, t) \epsilon \varphi_{RB}). \quad (65)$$

Utilizando esse e os demais elementos movimenta-se as estações pelo relevo a fim de buscar soluções para o problema.

6.2.6 Constantes de Calibração

As constantes k, α e γ, utilizadas na Equação (67) para atribuir pesos às superfícies utilizadas de maneira a ponderar diferentes critérios. Seus valores são apresentados na Tabela 18 e foram obtidos empiricamente durante o período de testes do algoritmo. Esses valores derivam das faixas dinâmicas dos diferentes índices (superfícies) combinados na heurística proposta. As Figura 55 e Figura 56 apresentam respectivamente os histogramas dos valores das superfícies $\boldsymbol{P_{cob}}$, $\boldsymbol{PS}$, $\boldsymbol{PCF}$e $\boldsymbol{PCRI}$. Vemos que, com as normalizações empregadas em suas definições, elas se encontrarão na faixa entre 0 e 1. Assim, a atribuição de pesos distintos se deve a diferentes conhecimentos esperados da experiência (heurísticas).

Tabela 18 - Constantes de calibração utilizadas na Equação (67)

Constante	Valor
k	2
α	$4 \cdot \omega$
γ	5

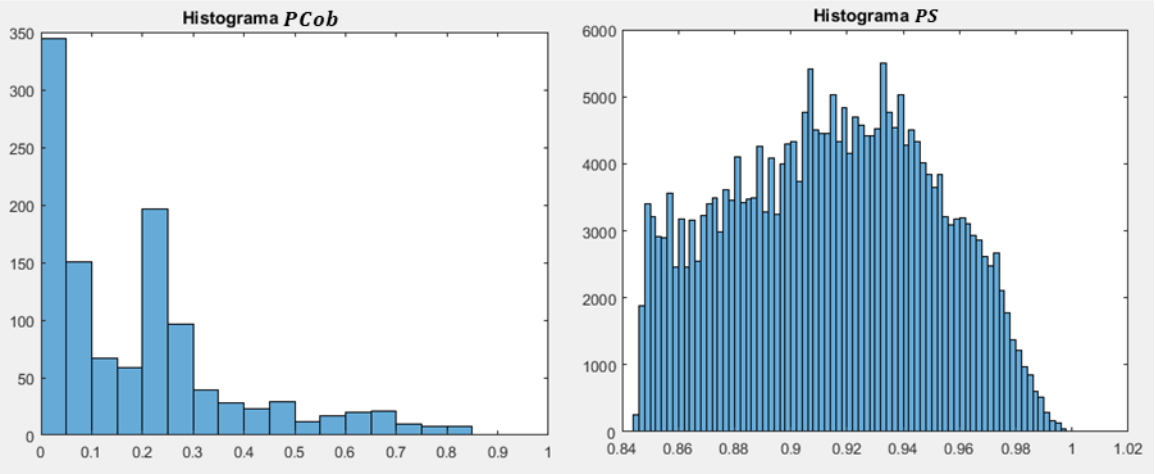

Figura 55 – Histogramas das variáveis $\boldsymbol{Pcob}$ e $\boldsymbol{PS}$ após a execução do algoritmo no grupo de teste.

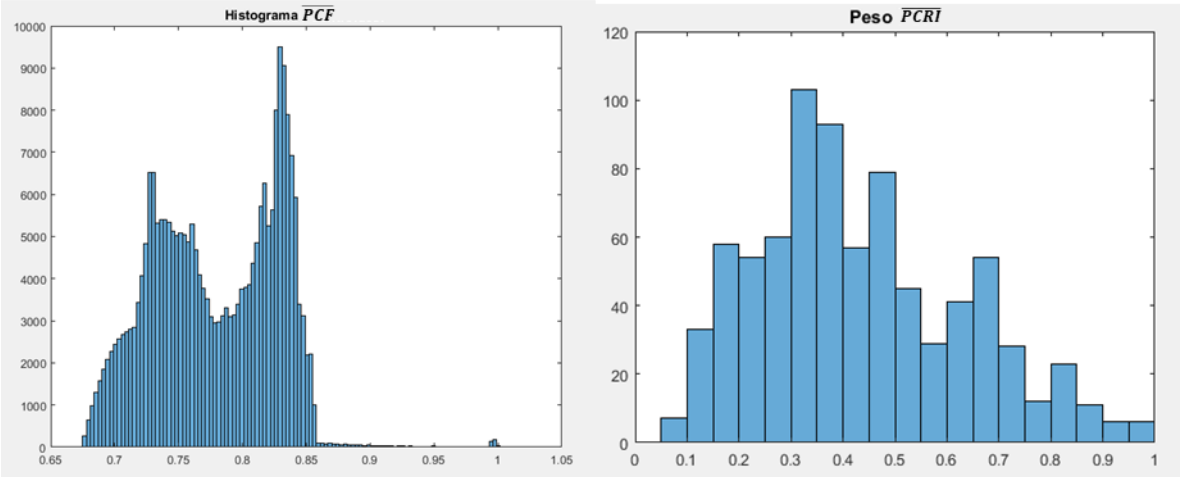

Figura 56 - Histogramas de $\boldsymbol{PCF}$ e $\boldsymbol{PCRI}$ após a execução do algoritmo no grupo de teste.

As constantes k e γ direcionam pontos altos como candidatos, próximos das regiões não cobertas da RI. A constante α faz com que as estações se aproximem

da RI até que estejam próximas o suficiente para gerar alguma cobertura na mesma e, após isso, valora a região no entorno da RI de forma a possibilitar os deslocamentos das estações candidatas também por essa região. Isso ajuda a afastar os pontos candidatos da RI e de evitar a altas concentrações de estações em pequenas regiões da RI. Ambos os casos ocorrem conforme $\omega(nTx,t)$ é valorado segundo a Equação (66).

$$\omega(nTx,y) = \begin{cases} 0{,}5, & Pcob(nTx,t) \neq 0 \\ 2, & Pcob(nTx,t) = 0 \end{cases} \quad (66)$$

Definidos k, α e γ, têm-se as superfícies utilizadas no cálculo da Equação (67) equilibradas, permitindo auto arranjo entre diferentes transmissores.

$$Cand(nTx,i,j,t) = \{Pcob(nTx,i,j,t) * RB(nTx,i,j,t) * [k \cdot PS(i,j) + \alpha \cdot PCF(i,j) + \gamma \cdot PCRI(nTx,i,j,t)]\} \quad (67)$$

O uso das constantes de calibração é muito importante, pois sem elas o processo de busca tende a ter a sua convergência para as melhores regiões de maneira mais lenta.

6.2.7 O Processo Iterativo

A cada iteração são calculadas as coberturas usando o modelo ITU-R P.1546 com os parâmetros otimizados em [48]. Isso permite obter as frações de cobertura individuais e conjuntas, as sobreposições entre as coberturas das diferentes estações transmissoras na RI. Com essas informações e o relevo são calculadas as superfícies $Pcob(nTx,i,j,t)$, $RB(nTx,i,j,t)$, $PS(i,j)$, $PCF(i,j)$ e $PCRI(nTx,i,j,t)$ com as equações definidas em 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3 e 6.2.4, e definidos os raios de movimentação e regiões de busca em 6.2.5. Com isso, obtêm-se as posições candidatas para mover as estações transmissoras.

Do que vimos, é patente a incapacidade de prever-se o quão efetiva será a cobertura usando a posição candidata para as estações. Assim, para inserir alguma aleatoriedade no processo e permitir sair de possíveis boas configurações mas não quando consideram-se regiões maiores (sair de

máximos locais), utiliza-se uma parcela aleatória $\mathcal{N}(v,\sigma)$ à função heurística, conforme a Equação (68).

$$\left(i^*(nTx), j^*(nTx)\right) = \arg max_{i,j \in Z}\, Cand(nTx, i, j, t) + \mathcal{N}(v, \sigma^2) \tag{68}$$

Ou seja, a posição das estações na próxima iteração é escolhida em função do valor máximo da soma de todas as superfícies ajustadas pelos pesos ou constantes de calibração k, α e γ e da variável aleatória normal.
almente distribuída contida dentro de $\boldsymbol{RB}$. Esses índices ponderam o produto entre a região de busca e a qualidade da cobertura do ponto dada as diversas superfícies qualitativas.

Para tornar a execução do algoritmo mais eficiente são apenas considerados como possíveis candidatos os máximos regionais da camada de relevo de entrada. Máximo regional é uma função utilizada em processamento de imagens que, para uma fração de tamanho de 3x3 pixels, elege o maior valor e seus vizinhos de mesmo valor como máximos regionais [52]. Foi gerada uma matriz **M** binária de classificação de máximos regionais,

$$M(i,j) = \begin{cases} 1, & E_{i,j} \text{ é } máximo\ regional \\ 0 & caso\ contrário \end{cases} \tag{69}$$

onde cada ponto (i, j) é classificado conforme o critério de máximo regional.

Quando um conjunto de candidatos é encontrado, as suas posições e as permutações das mesmas são procuradas no histórico de conjuntos de posições candidatas e no caso afirmativo esse conjunto é ignorado e uma nova VA é gerada, os raios de busca são incrementados em uma célula a partir do ponto atual para que, ao repetirmos a busca, o aumento da quantidade de posições candidatas aumente a chance de se não obter permutações já contidas no histórico de posições.

O pseudo-código do Algoritmo 3 apresenta o processo iterativo. Esse algoritmo é executado até atingir-se o critério de parada.

Algoritmo 3 – Método heurístico de otimização de posicionamento de estações
Inicialização

Faça t = 1
Calcula ITU-R P.1546
Calcula PCbt(nTx,t) usando a Equação (60)
Armazena PCbt(nTx,t) em Pcob(nTx,i,j,t)
Calcula PCbtCombinada(t) usando as equações (45) e (46)
Armazena PCbtCombinada(t) em HistPctCbt(t)
Armazena ManchasCbt(t) em HistManchasCbt(t)
Se PCbtCombinada(i) >= CriterioParada
    INTERROMPE A EXECUÇÃO
Fim se

Loop Principal

Repetir até PcCbtCombinada > CritérioParada
    Faça t = t + 1
    Para cada nTx
        Calcula Raio(nTx, t) usando a Equação (62)
    Fim para
Calcula ITU-R P.1546 com equações (9) a (24)
Calcula PCbt(nTx,t) com Equação (60)
Calcula PCbtCombinada(t) com equações (45) e (46)
Calcula PCRI(nTx,i,j,t) com equações (49) a (53)
Armazena PCbtCombinada(t) em HistPctCbt(t)
Armazena ManchasCbt(t) em HistManchasCbt(t)
1-
    Para cada nTx
        Calcula RB(nTx) usando as equações (63) a (65)
    Fim para
Calcula Cand(nTx,i,j,t) usando as equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e (48)
Se existe Candidato(1:nTx) em HistoricoCandidatos
    Incrementa raio(1:nTx) em 1 célula
    Retorna a execução em **1**
Fim se
Armazena Cand(1:nTx) em HistoricoCandidatos
Se PCbtCombinada(t) ≥ Critério de parada
    Armazena Cand(1:ntx) em Solucao
Fim se

FIM LOOP

Esse algoritmo de cálculo é então executado iterativamente até que seja alcançado o critério de parada. No Algoritmo 4, é realizado o incremento da fração r aumentando assim a quantidade de máximos da RI utilizados (aumentando a variabilidade da busca).

Algoritmo 4 – Loop de escalada de r

Faça r = 0,2

Loop Principal

Enquanto r $\leq$1

Execute Algoritmo 3

Incrementa r em 0,2

Fim Enquanto

FIM LOOP

Após atingir o valor máximo de r, é passível também o incremento da quantidade de estações T até $Tmax$, essa operação é executada no Algoritmo 5. Com o aumento do número de transmissores na RI, espera-se que a cobertura combinada seja superior à obtida na melhor iteração do loop anterior.

Algoritmo 5 – Loop principal incremento de Tx

Inicializa h, EIRP
Faça T = 1
Calcula PCentroidesF usando a equações (55) a (59)
Calcula PS(i,j) usando a Equação (54)

Loop Principal

Para T até Tmax

Para cada nTx

Inicializa (i,j) de nTx

Fim para

Execute Algoritmo 4

Incremente N em 1

Fim para

FIM LOOP

No capítulo a seguir, avaliamos o desempenho dessa proposta.

7 DESEMPENHO DO MÉTODO

Primeiramente aplicou-se o método na superfície de teste. Foram calculadas as superfícies apresentadas nas seções 6.2.1 até 6.2.4 e os critérios de movimentação na seção 6.2.5. Na seção 7.2 o desempenho é avaliado em um caso de um município real.

7.1 Superfície de teste

A superfície teste é quadrada como a apresentada na Figura 57, ela possui um tamanho total de 500x500 pixels totalizando 7500 km² de área com a RI no seu centro, também quadrada, com 200x200 pixels e área total de 1200 km². Esse recorte é, para fins de teste do algoritmo, aplicado sobre relevo de uma parte do município de Petrópolis no Estado do Rio de Janeiro.

No primeiro passo, todas as estações são localizadas nos extremos da superfície, primeiramente nos vértices do retângulo do relevo e, após isso, no centro do segmento de reta formado entre duas estações. A distribuição depende da quantidade de transmissores (que serão distribuídos uniformemente ao longo do contorno do relevo). A Figura 57 apresenta um exemplo das posições iniciais para as 4 estações da SFN.

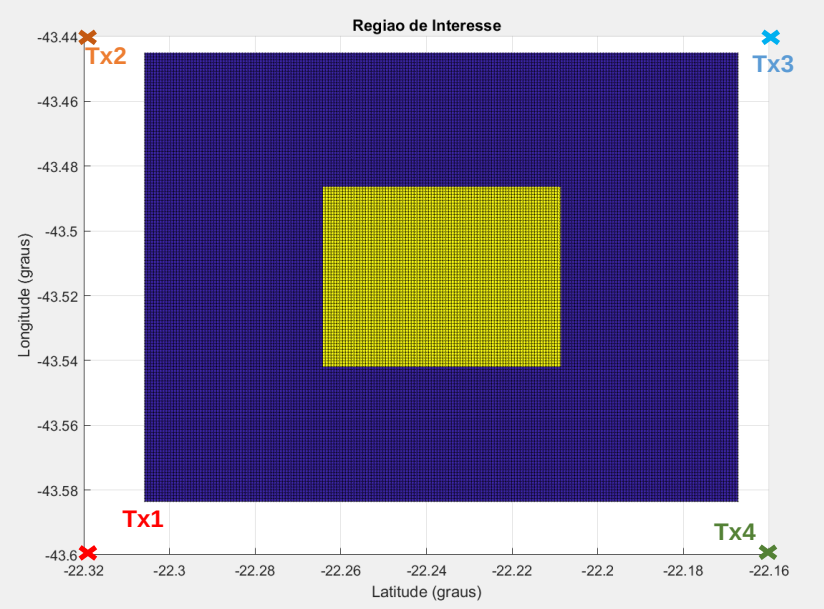

Figura 57 – Exemplo do posicionamento inicial de estações no relevo de entrada utilizado pelo método.

A superfície de teste foi usada durante o desenvolvimento do método para toda a validação da proposta. Sua geometria simples é muito importante para analisar a movimentação das estações.

7.1.1 Resultados

O Algoritmo 4 é executado e as estações são reposicionadas enquanto avalia-se a cobertura total na RI. A Figura 58 mostra a evolução das posições das estações (cada estação representada por uma cor) durante o processo iterativo. Cada estação tem sua posição inicial nos extremos do relevo, como apresentado na Figura 57 e, durante as iterações, tende a se aproximar da RI que as suas manchas de cobertura comecem a interagir e o posicionamento das estações numa iteração passa a interferir nos posicionamentos das demais estações da SFN. Uma tendência comum notada durante a execução do Algoritmo 4 é que cada estação acaba se concentrando em uma região de parte da RI ou suas proximidades enquanto varia aos poucos sua posição dentro dessa região de forma a obter uma combinação com as demais estações que gere o mínimo de sobreposição possível dadas as características do relevo, RI e das estações.

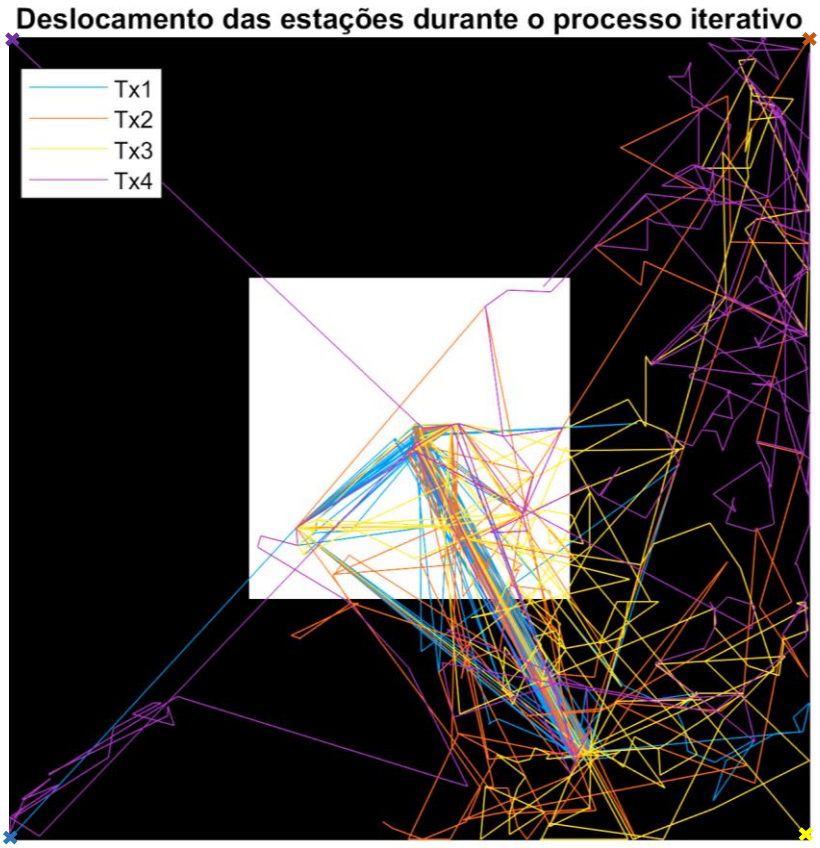

Figura 58 –Deslocamento dos transmissores na superfície de elevação durante o processo iterativo. Os pontos vermelho, branco, verde e azul representam cada um uma das quatro estações da SFN.

A Figura 59 mostra a evolução da capacidade de cobertura combinada da rede conforme o Algoritmo 4 é executado para 4 estações conforme incrementamos a variável r. Cada uma das divisões em vermelho representa o incremento da variável r, fração dos máximos regionais da RI utilizados como candidato. O algoritmo é executado dessa maneira de forma que normalmente as regiões da curva correspondentes aos últimos incrementos em r representam as melhores regiões do relevo para a instalação das estações da rede SFN.

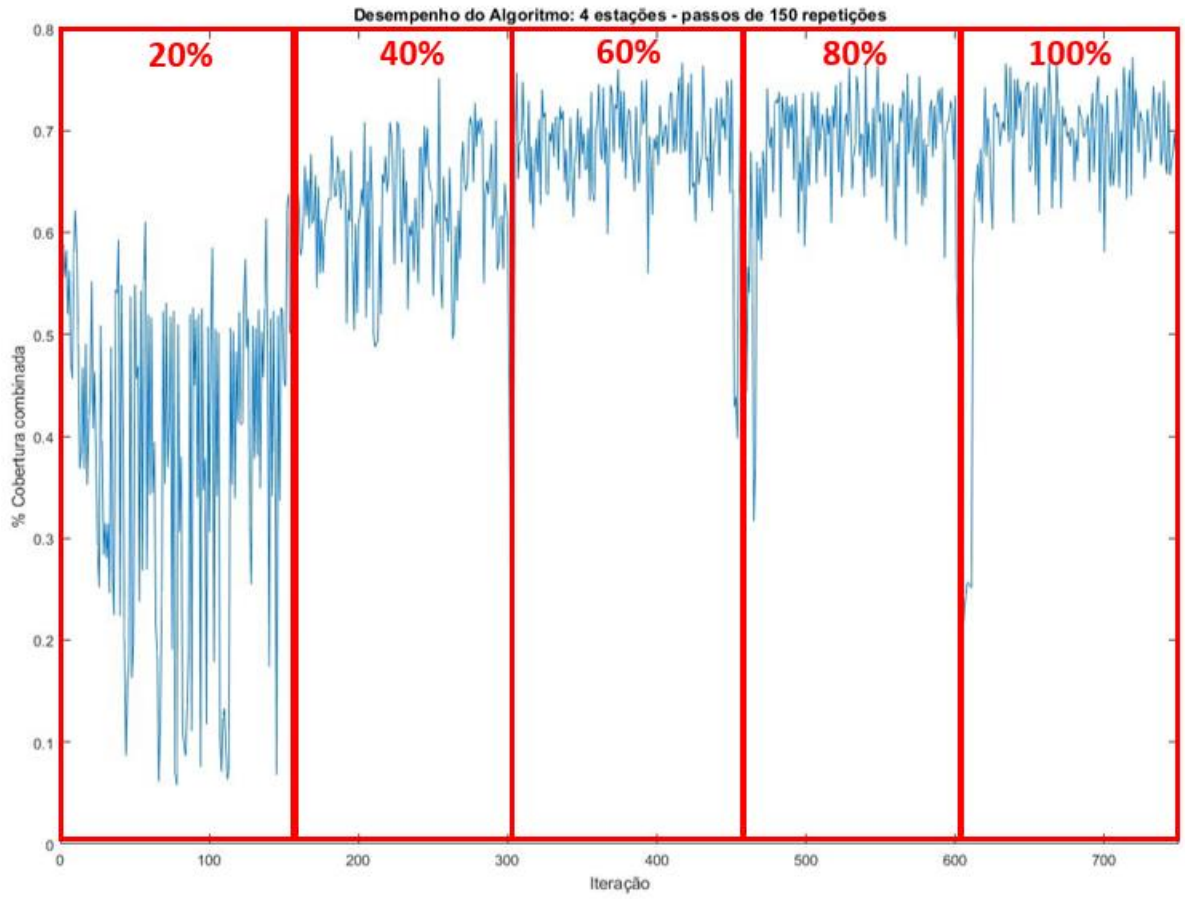

Figura 59 – Desempenho do algoritmo na configuração de 4 estações transmissoras com passo de 150 repetições, cada passo com 20, 40, 60, 80 e 100% do centroides mais elevados por passo.

As primeiras janelas de r são correspondem ao teste e determinação dos melhores pontos do relevo para a cobertura individual da RI enquanto gradativamente passa a testar as combinações de pontos já avaliados anteriormente. Isso explica a inclinação mais acentuada no começo e muito mais sutil no final do *loop* do Algoritmo 4 para uma determinada quantidade de estações transmissoras.

Na região de teste foi executado o algoritmo para a quantidade de transmissores de 1 a 9, todos com diagramas de radiação omnidirecional e potência de transmissão EIRP de 10W e altura do centro de irradiação h de 30 m acima do valor do terreno. A condição de cobertura foi obter um campo mínimo de 58 dBµV/m. Para melhor visualização, a Figura 60 até a Figura 65 mostram respectivamente as manchas de cobertura para uma estação transmissora de potência EIRP de 1 W, 10

W e 100 W na coordenada escolhida na busca como a melhor posição após o ciclo iterativo. A Tabela 19 mostra os resultados, que são a porcentagem da RI que tem a condição de cobertura atendida para cada ponto escolhido.

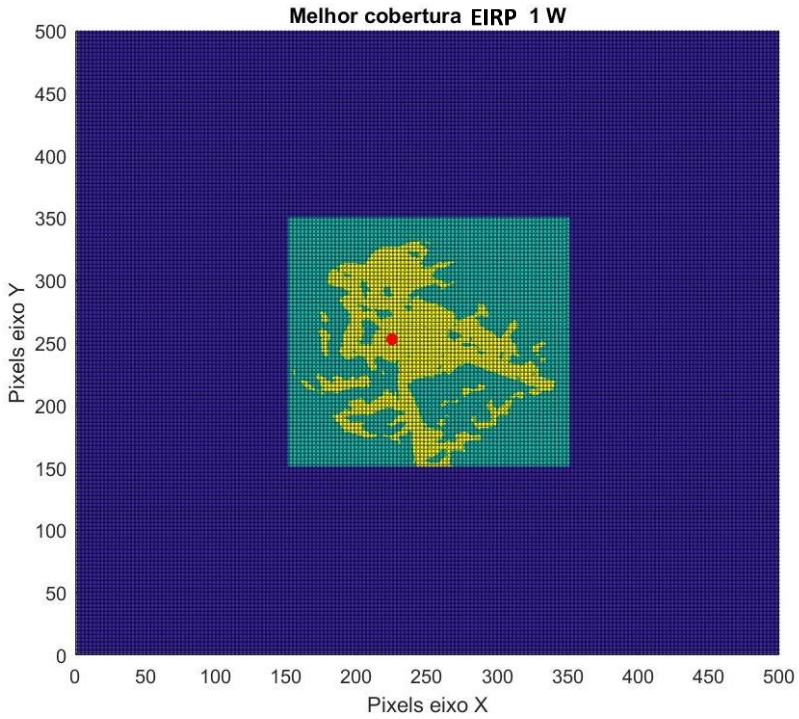

Figura 60 – Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 1 W.

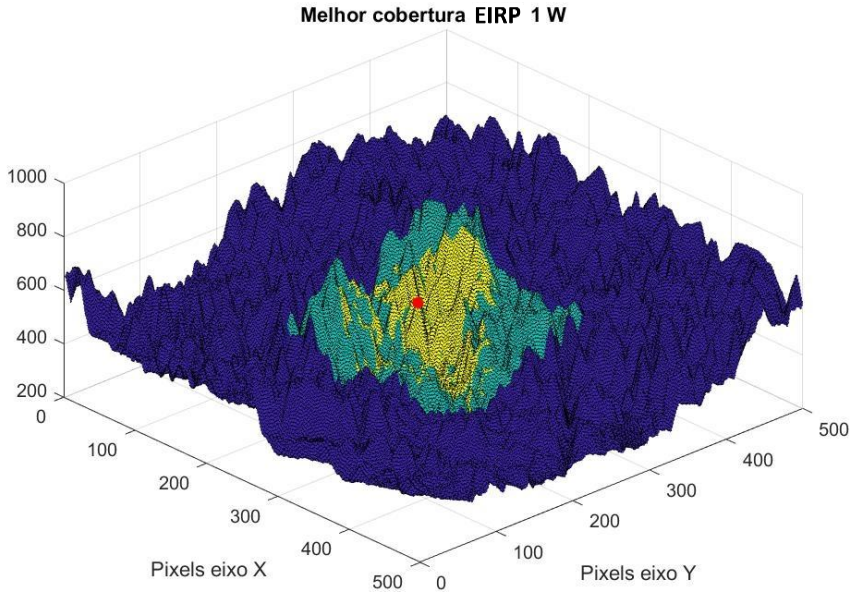

Figura 61 - Vista tridimensional da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 1 W.

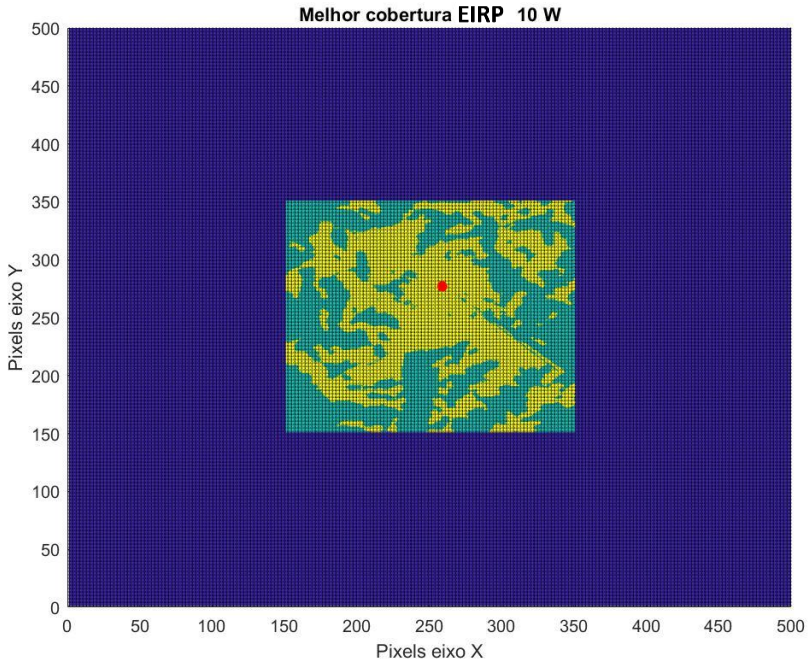

Figura 62 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 10 W.

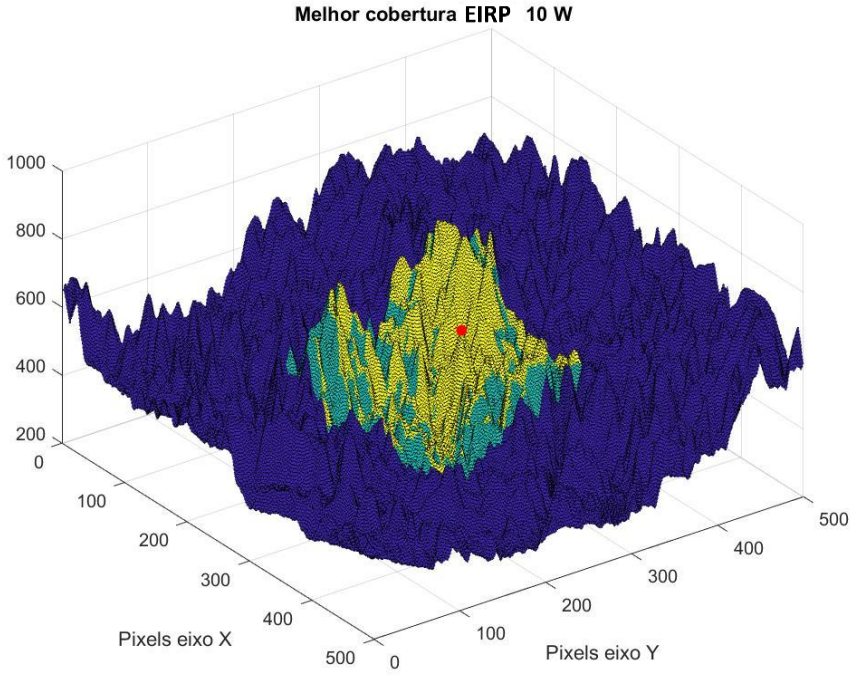

Figura 63 - Vista tridimensional da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 10 W.

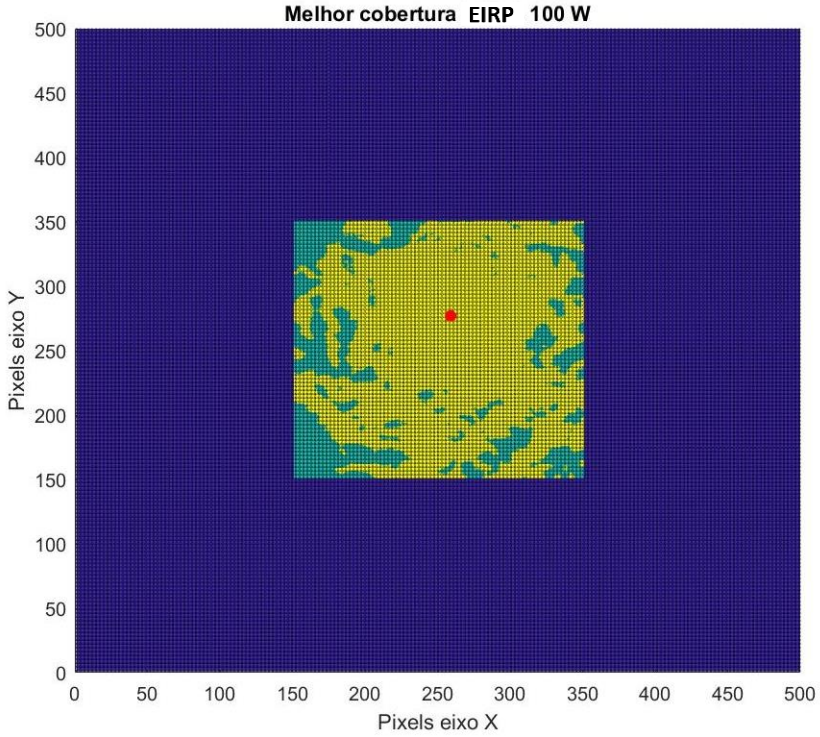

Figura 64 – Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 100 W.

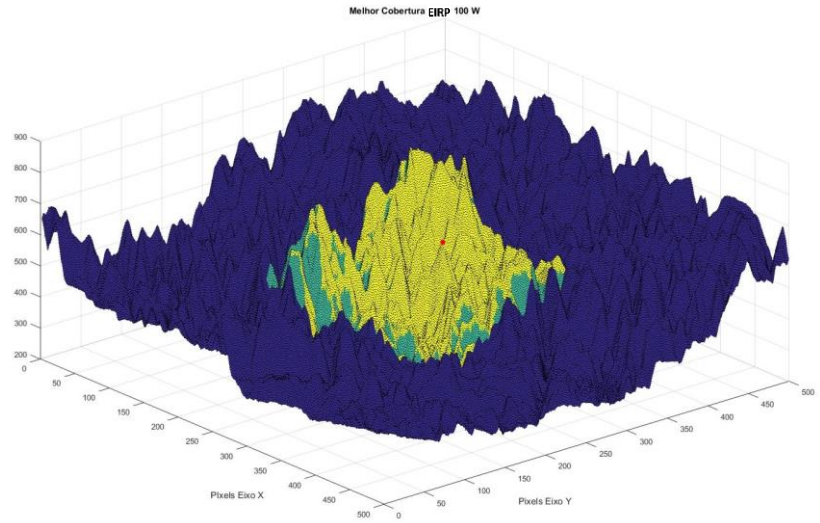

Figura 65 - Vista tridimensional da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 100 W.

Tabela 19 – Percentual de cobertura por potência EIRP de transmissão na melhor posição escolhida após a execução do algoritmo na região de teste

Potência EIRP	% Cobertura	Posição (X,Y)
1 W	27,98 %	(253, 255)
10 W	49,18 %	(277, 259)
100 W	75,92 %	(277, 259)

Observa-se que apesar de obter resultados/coberturas diferentes devido às diferentes EIRPs, o algoritmo proposto escolheu pontos bastante próximos nos três casos. O que é razoável dado que a atenuação do percurso é a mesma independentemente da potência de transmissão.

Da Figura 66 à Figura 70 são apresentados os gráficos de desempenho para as diferentes quantidades de estações, representadas pela variável T, no Algoritmo 5, ao alterar a fração dos centroides. Neste caso foram utilizados os passos de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% dos centroides a cada 250 iterações e potência EIRP de 10 W para todos os transmissores.

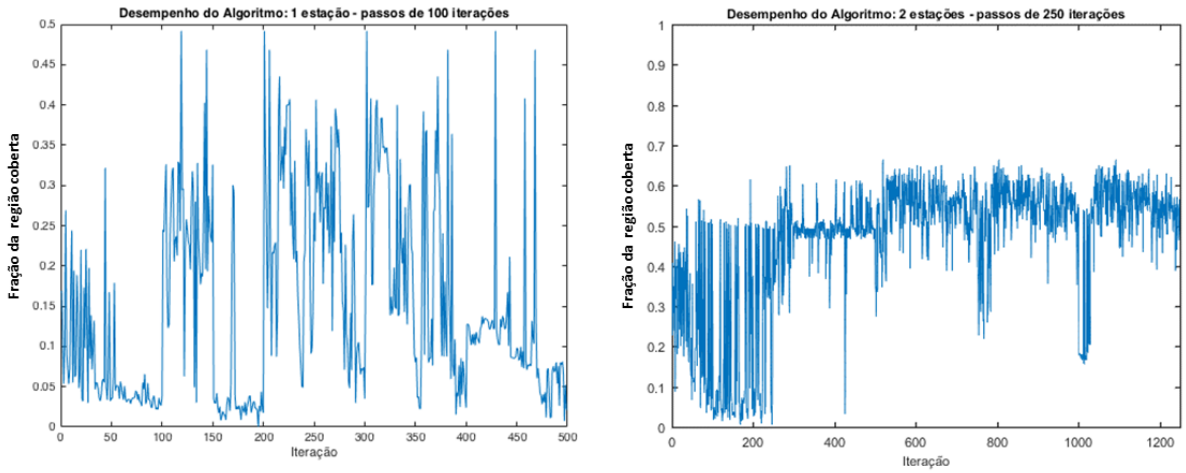

Figura 66 – Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na superfície de teste.

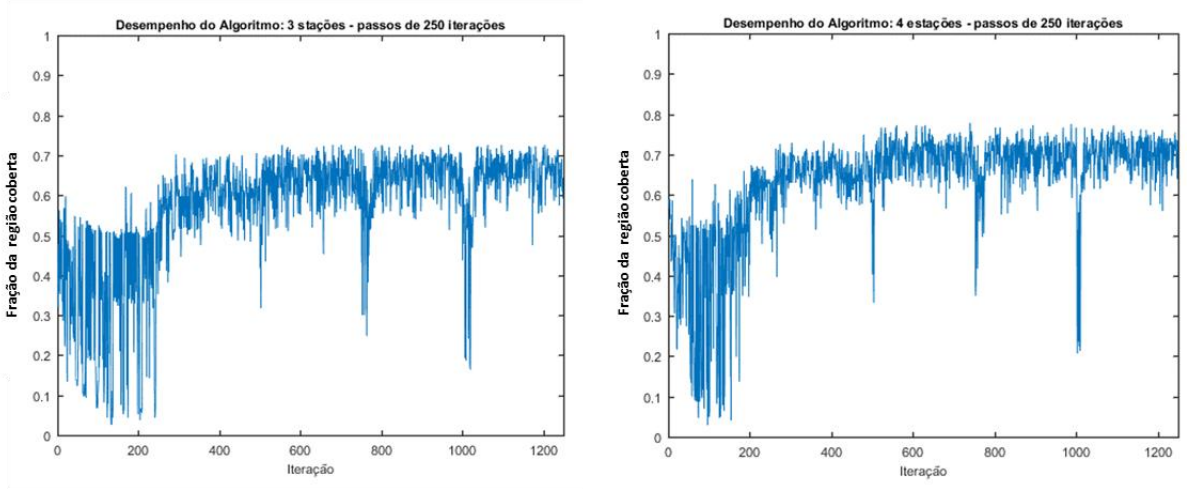

Figura 67 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na superfície de teste.

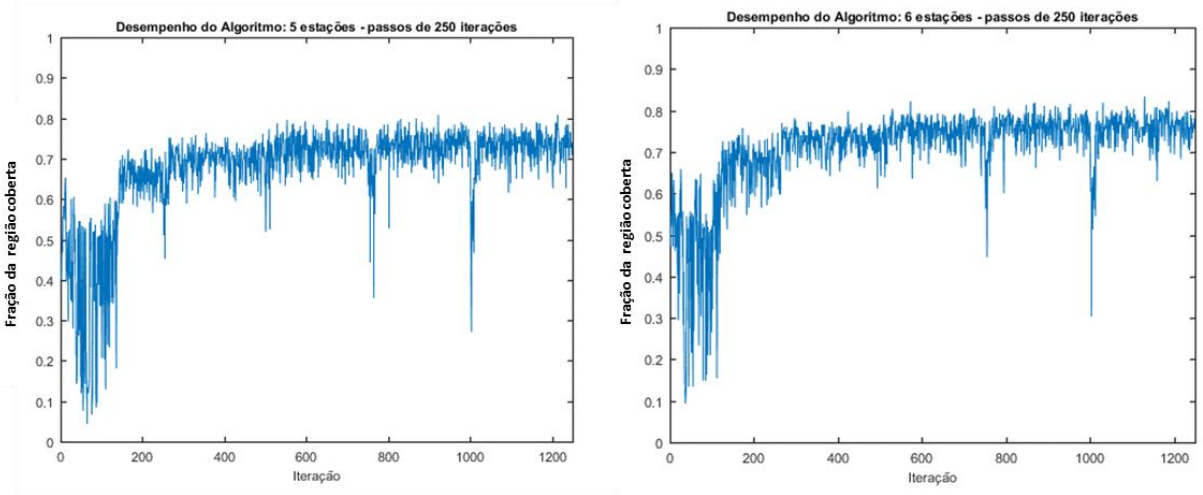

Figura 68 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de cinco estações (esquerda) e seis estações (direita) na superfície de teste.

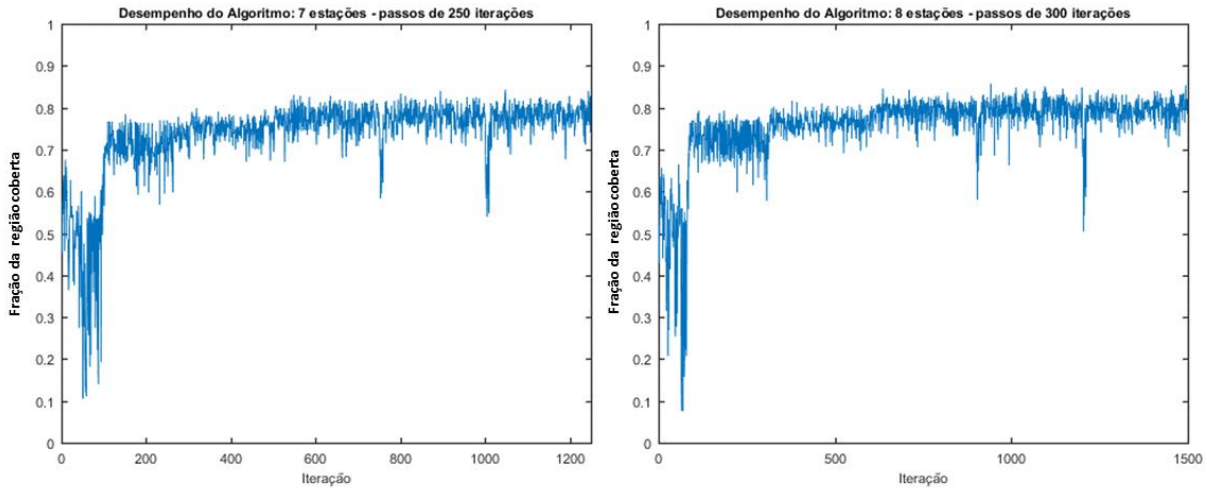

Figura 69 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de sete estações (esquerda) e oito estações (direita) na superfície de teste.

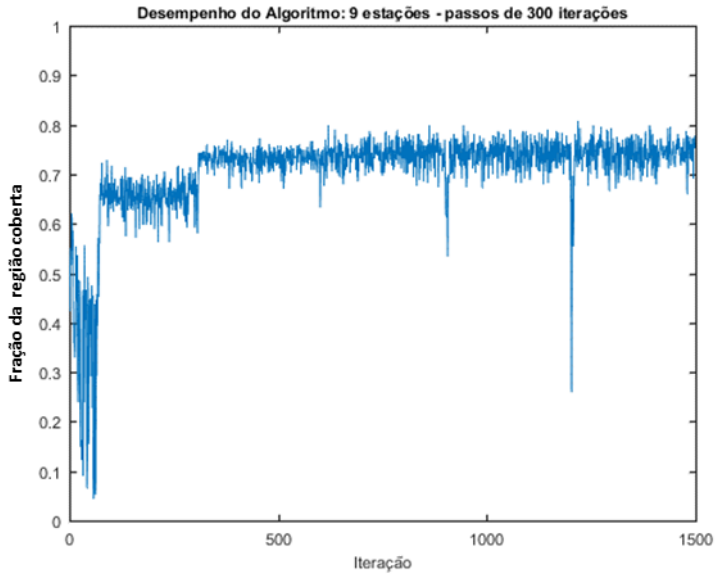

Figura 70 - Gráfico da evolução do algoritmo para uma rede de nove estações na superfície de teste.

Em todos os casos, a evolução do algoritmo passa inicialmente em um vale. Esse vale se deve à busca inicial que não considera informações prévias. Nas primeiras iterações, avalia-se os pontos mais altos e alimenta-se a superfície $Pcob$, isso pode ser observado da Figura 66 à Figura 70. Após isso o algoritmo passa para a fase de crescimento estável, pois parte dos pontos da superfície de teste já tem a sua capacidade de cobertura avaliada no processo iterativo e, as melhores combinações entre esses pontos passam a ser testadas. Quanto maior é a

quantidade de estações de uma SFN, maior é a quantidade de pontos que são testados a cada iteração e, consequentemente, menos iterações são necessárias para compor $Pcob$ e, assim, consegue-se chegar à segunda fase mais rapidamente. Essa segunda fase pode-se chamar de fase predominantemente combinatória onde o algoritmo passa a testar as combinações de acordo com as regras estabelecidas. A Tabela 20 apresenta os valores obtidos de cobertura conjunta da RI e a quantidade de iterações necessárias para tal durante a execução do Algoritmo 5. Esses valores são consolidados na Tabela 21 e Figura 71, onde pode-se observar a porcentagem de cobertura obtida na sua melhor iteração por quantidade de estações.

Tabela 20 – Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados

T	20%		40%		60%		80%		100%	
	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)
1	44	32,17	119	**49,18**	201	**49,18**	322	**49,18**	429	**49,18**
2	193	61,58	290	64,85	419	**66,32**	804	**66,32**	1092	**66,32**
3	169	62,14	293	70,20	555	72,43	801	**72,68**	1063	**72,68**
4	204	67,22	479	74,87	740	**77,91**	894	77,26	1092	77,26
5	222	72,65	355	76,21	651	79,52	922	**80,80**	1214	80,64
6	173	75,91	424	79,76	573	82,13	869	81,80	1130	**83,25**
7	151	78,18	319	79,76	564	82,87	895	83,91	1048	**84,17**
8	114	79,34	378	81,63	636	84,46	942	**85,47**	1201	84,79
9	90	72,79	456	77,19	621	79,75	944	79,79	1218	**80,75**

Tabela 21 – Desempenho consolidado para todos os casos feitos na superfície de teste

T	Iterações	% Cobertura
1	119	49,18
2	419	66,32
3	801	72,68
4	740	77,91

5	922	80,80
6	1130	83,25
7	1048	84,17
8	636	84,46
9	1218	80,75

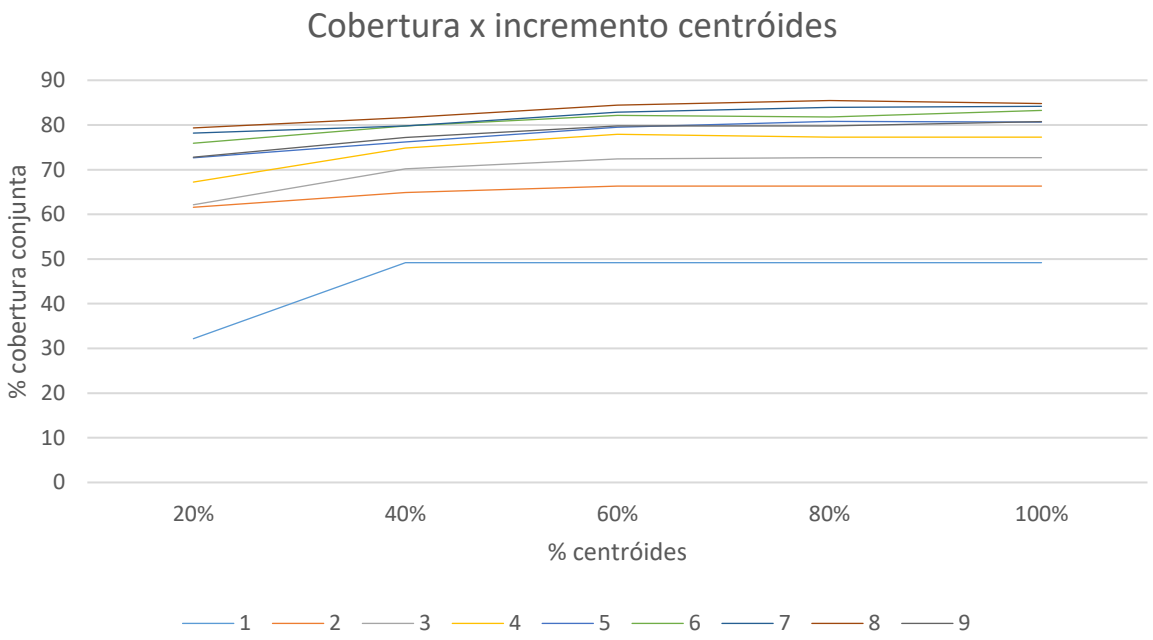

Figura 71 – Máxima cobertura conforme o incremento na quantidade de centroides utilizados.

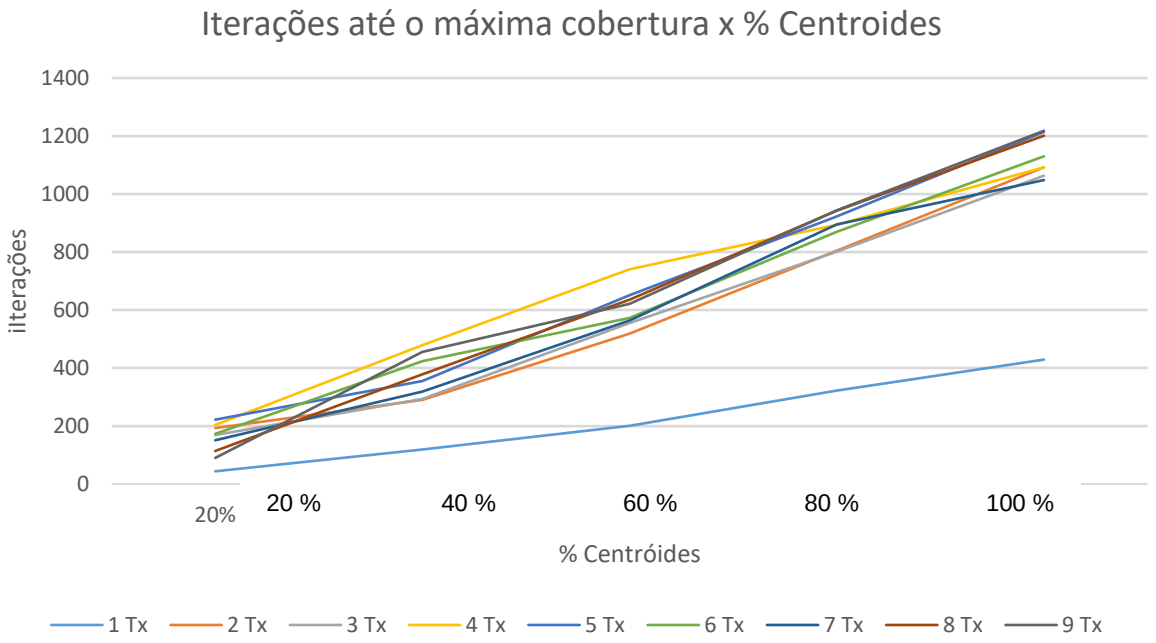

Figura 72 – Quantidade de iterações necessárias até a saturação do algoritmo.

Observa-se na Tabela 20 e na Tabela 21 que a otimização da cobertura normalmente evolui com o incremento do número de estações até que ocorre a estagnação desse valor. Isso ocorre porque, para um grande número de estações em áreas relativamente pequenas ocorre uma alta densidade de estações que geram muitas regiões de sobreposição. A regra da superfície RB se torna ineficiente, o que é favorecido pela característica omnidirecional das antenas de transmissão. Isso impede que as estações atendam certas regiões da RI sem gerar sobreposição nas demais, tornando muito difícil a tarefa de posicionar as estações de forma a complementar as coberturas das demais. Caso o resultado não seja satisfatório, uma alternativa para essa ocorrência seria utilizar o método de otimização com estações de EIRP maiores de forma a evitar esse comportamento e chegar ao objetivo com menos estações.

Observando os gráficos da Figura 66 até a Figura 70, a região da curva correspondente ao último passo com a utilização de todos os centroides presentes no relevo utilizado pode ter seus pontos utilizados como prováveis candidatos se a curva atingir o critério de cobertura exigido.

7.2 Caso realista

Após testadas a capacidades do método no caso de teste, ele também é utilizado em um caso real e consideravelmente mais complexo com o intuito de validar o método assim como modelo de propagação sintonizado.

7.2.1 A região de interesse

Foi escolhido o município de Queimados do Estado no Rio de Janeiro. A Figura 73 mostra um recorte do mapa que contém o município e a Figura 74 apresenta a imagem de satélite do mesmo.

Figura 73 – Mapa capturado do município de Queimados no estado do Rio de Janeiro.

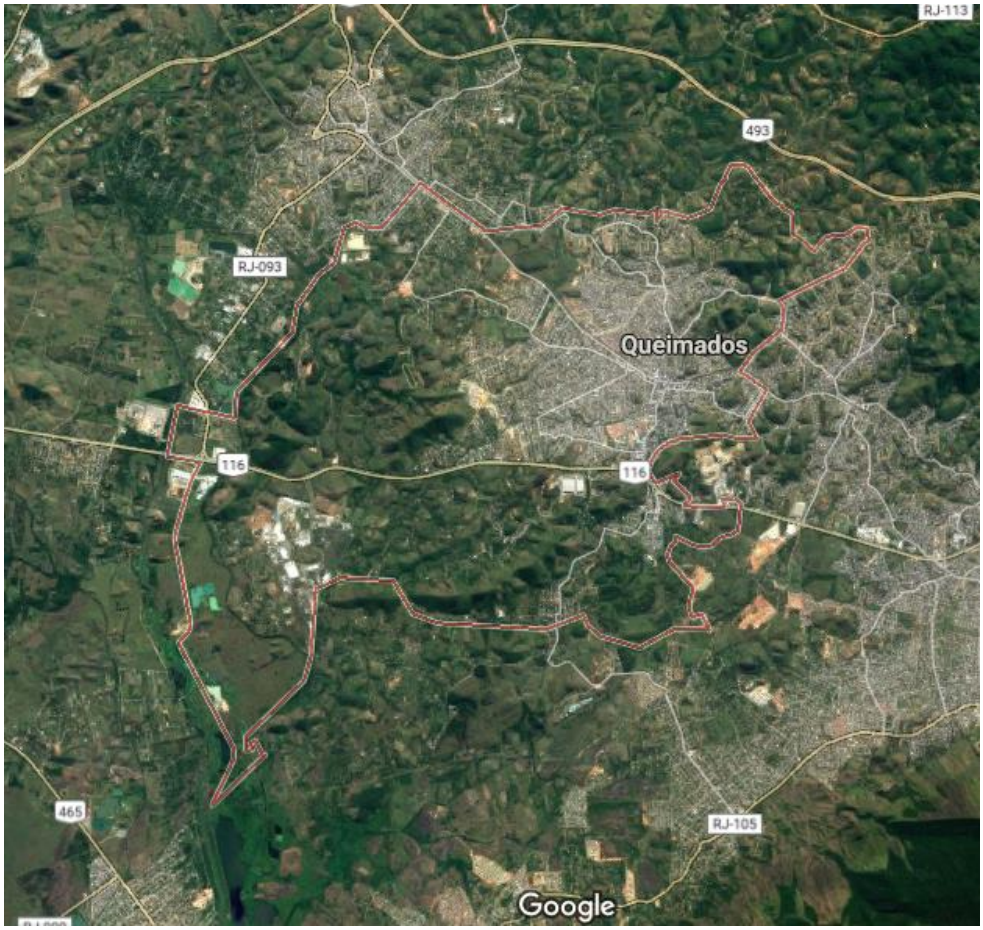

Figura 74 – Captura de satélite do município de Queimados no estado do Rio de Janeiro.

Foi gerada uma figura similar através da distribuição de população na região. Foram extraídos dados de [53] e [54] e filtrados de modo que píxeis que contem algum setor censitário foram considerados parte da RI e na Figura 75 e Figura 76 são mostradas diferentes vistas do relevo utilizado para os diversos cálculos utilizados para o método. Outras classificações podem ser utilizadas para definir a RI, tais como uma mínima densidade de pessoas por pixels ou uma quantidade mínima de televisores por residência, dentre outros [54].

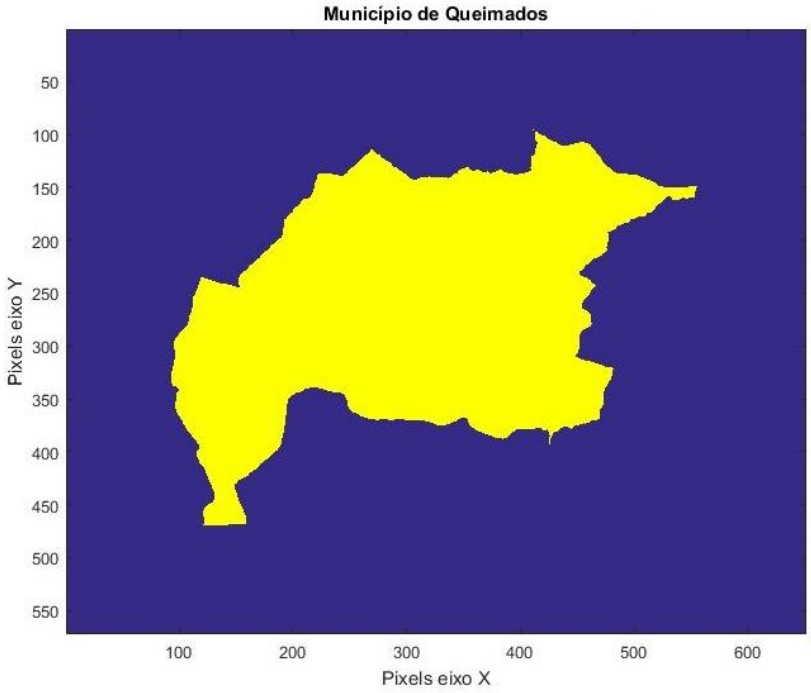

Figura 75 – Recorte de Queimados gerado a partir dos dados de população obtidos em [53] e [54].

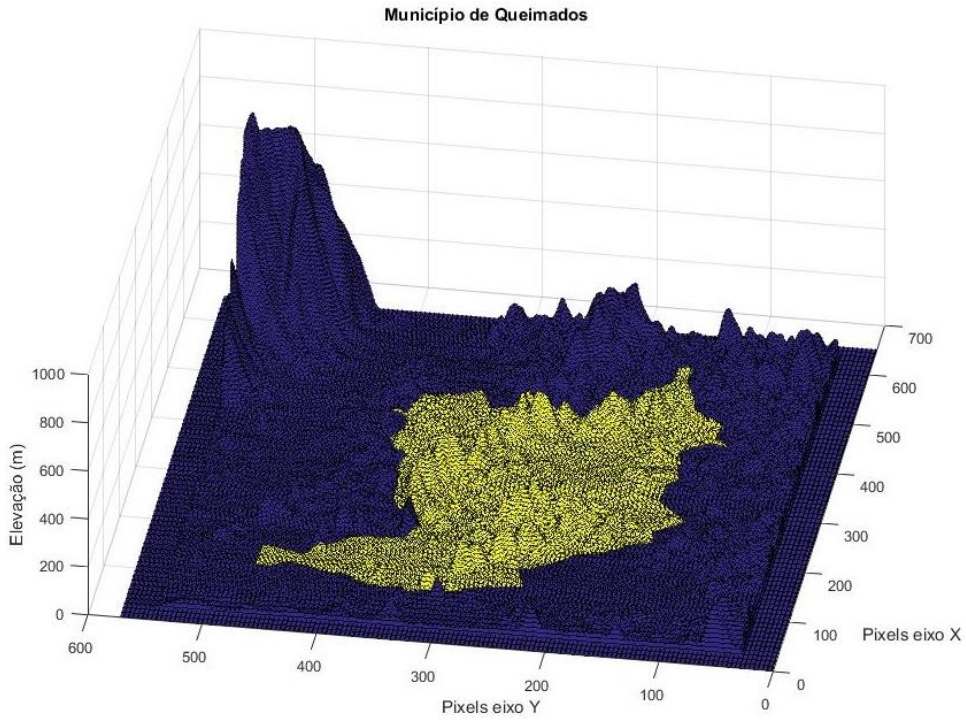

Figura 76 – Recorte de Queimados sobre o perfil de elevação extraído a partir de [53] e [54].

7.2.2 Resultados

O município de queimados tem um tamanho total de aproximadamente 77 km² e foi utilizado um relevo de aproximadamente 270 km². Foram testadas 3 diferentes configurações de transmissores; um conjunto de transmissores com EIRP igual à 1 W, outro de 10 W e um terceiro de 100 W. A Figura 77, Figura 78 e Figura 79 permitem a comparar as manchas de cobertura geradas, para um campo mínimo teórico de 58 dBµV/m, utilizando o método para uma rede de 1 transmissor e suas respectivas coberturas percentuais são apresentadas na Tabela 22.

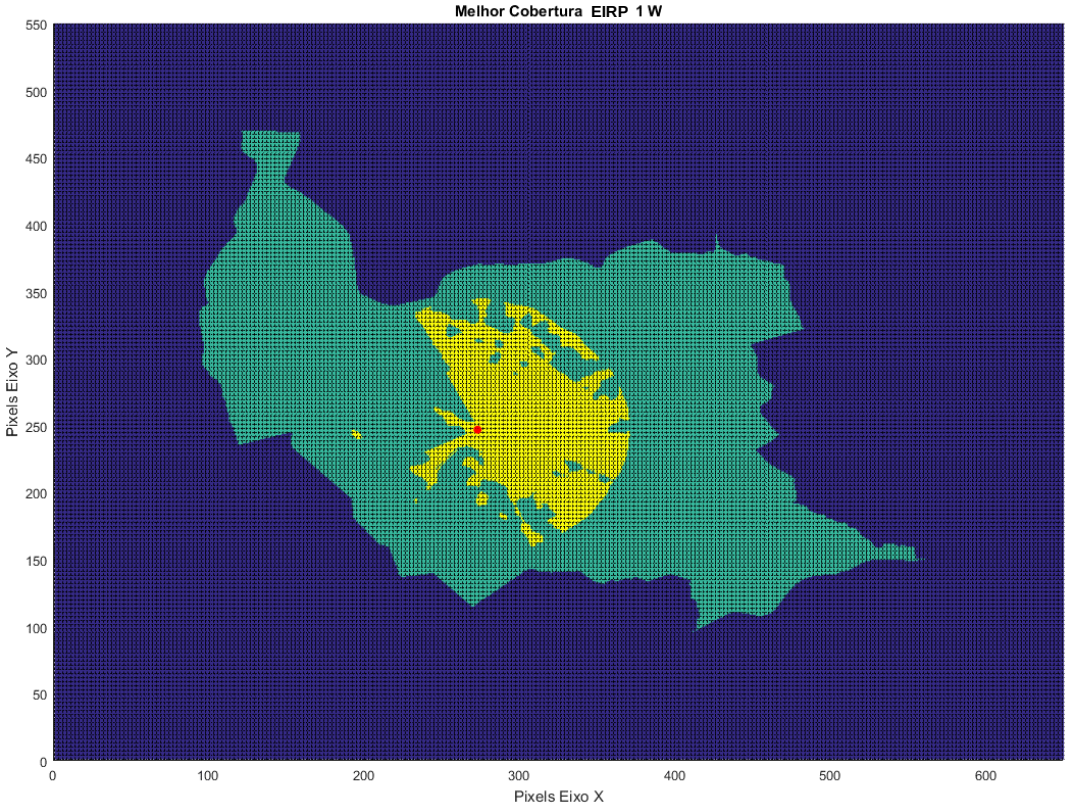

Figura 77 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 1 W.

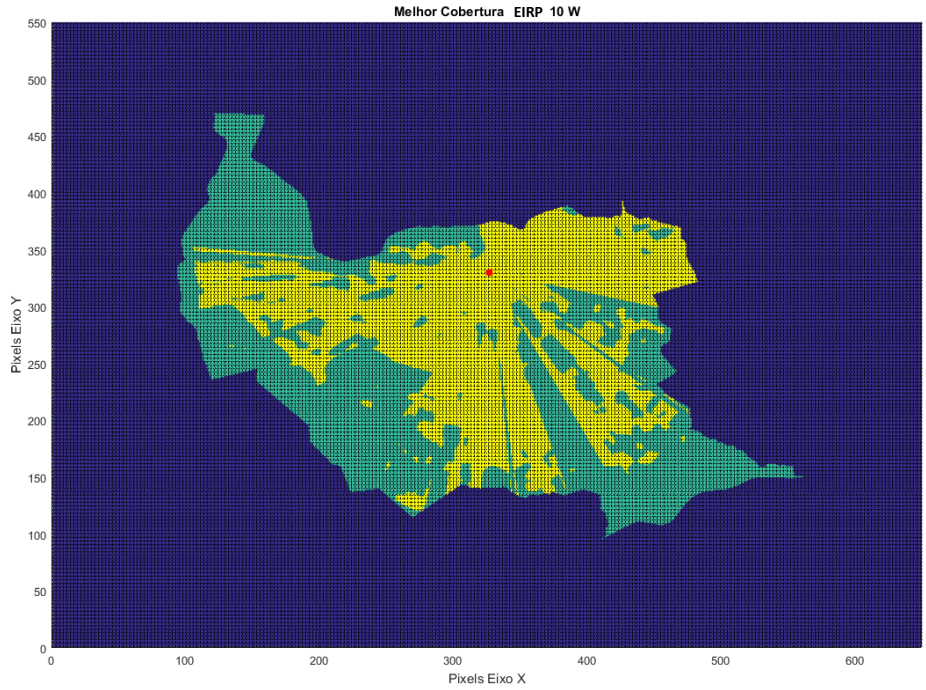

Figura 78 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 10 W.

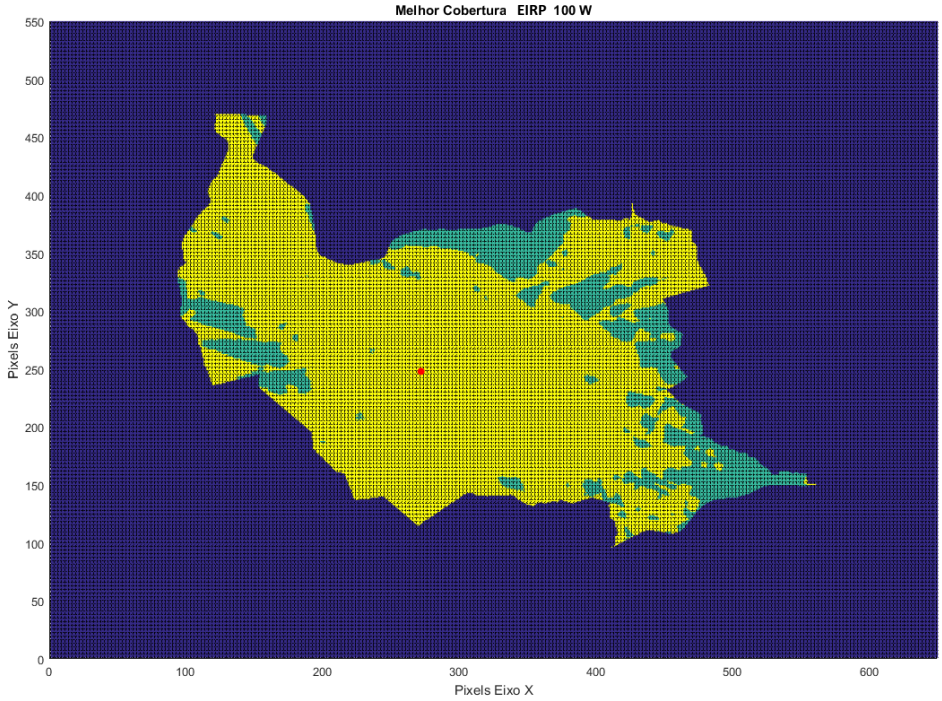

Figura 79 - Vista superior da mancha de cobertura para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo para uma estação com potência EIRP de 100 W.

Tabela 22 - Percentual de cobertura por potência EIRP de transmissão na melhor posição escolhida após a execução do algoritmo no município de Queimados

Potência E.R.P	% Cobertura	Posição (X,Y)
1 W	16,18 %	(273,247)
10 W	35,78 %	(327,330)
100 W	81,11 %	(272,248)

Para a melhor validação do método, executou-se o Algoritmo 5, a busca para redes de um até nove estações transmissoras em Queimados e seu entorno para três diferentes EIRPs; 1 W, 10 W e 100 W totalizando 27 buscas. As curvas de cada busca com estações de potência de 1 W são apresentadas na Figura 80 até a Figura 84.

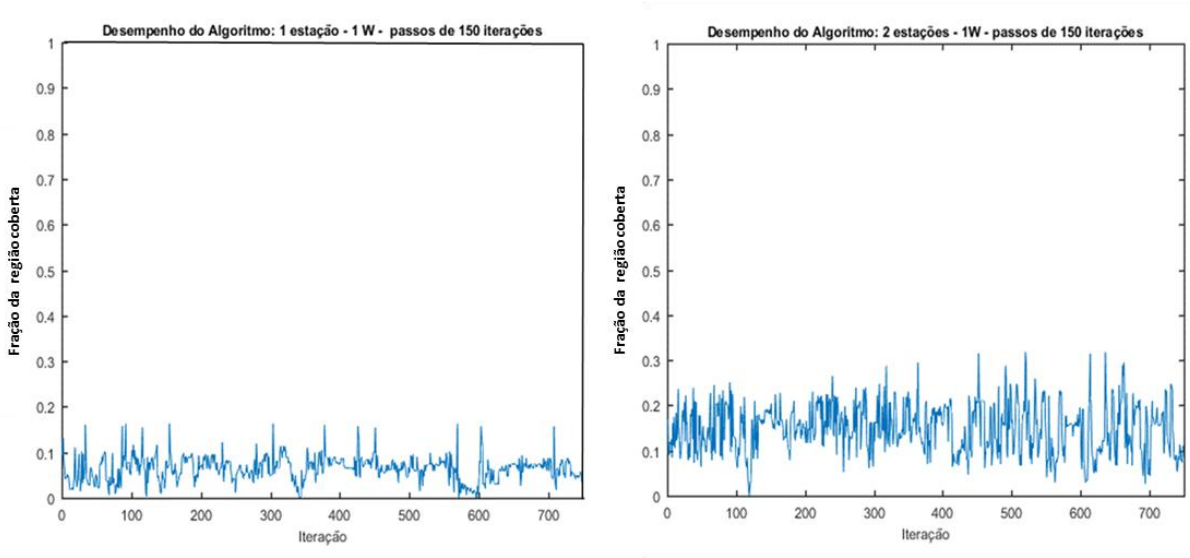

Figura 80 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W.

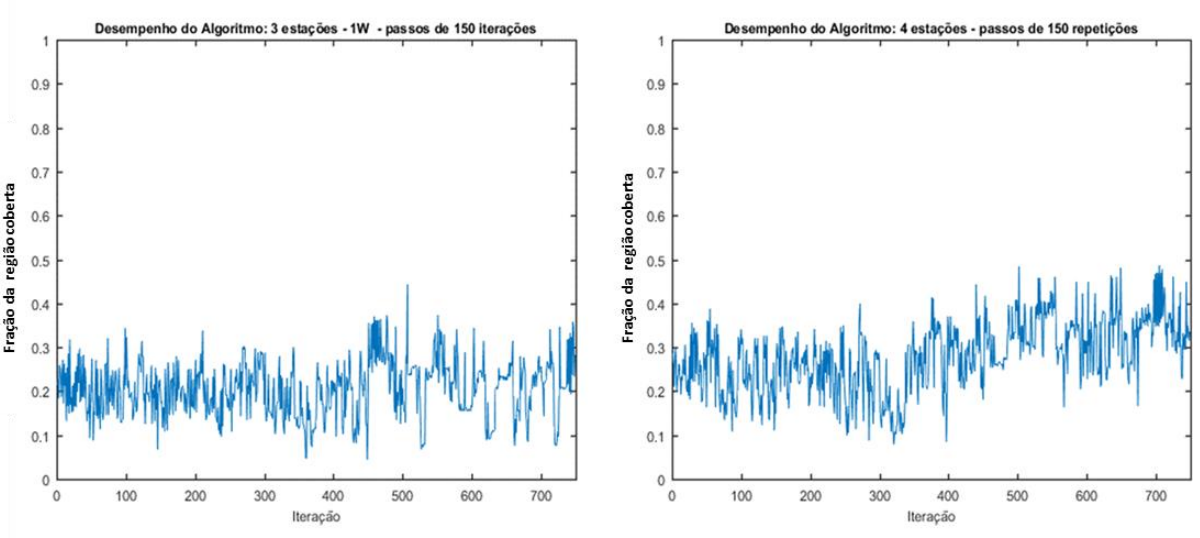

Figura 81 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W.

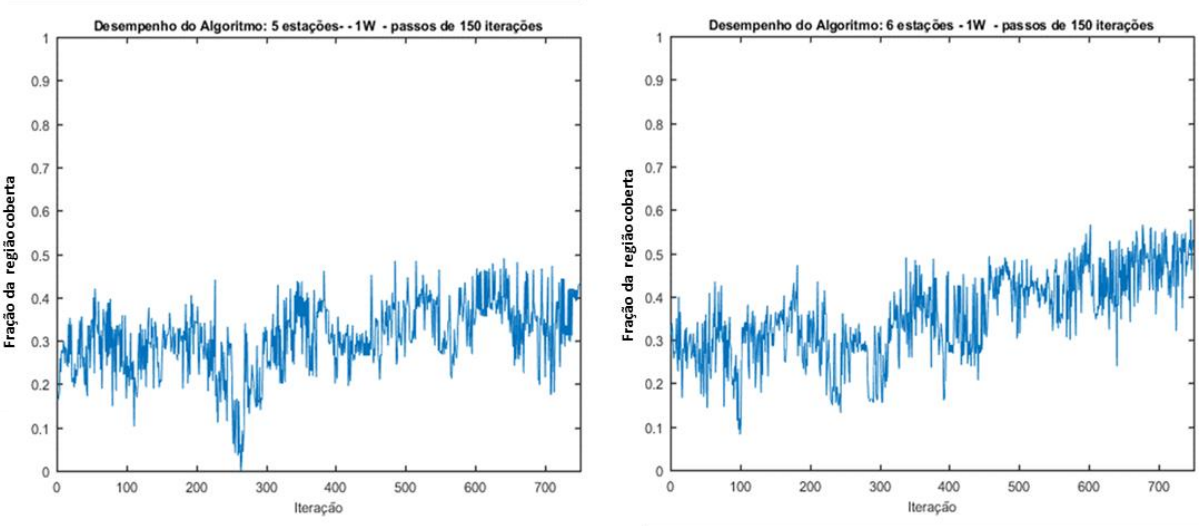

Figura 82 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de cinco estações (esquerda) e seis estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W.

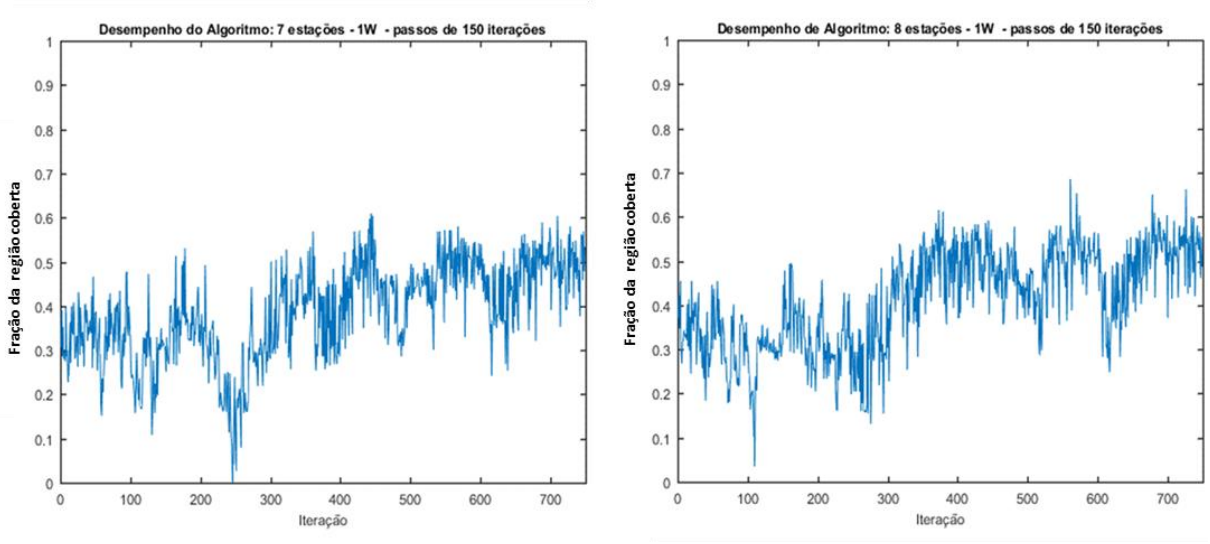

Figura 83 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de sete estações (esquerda) e oito estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W.

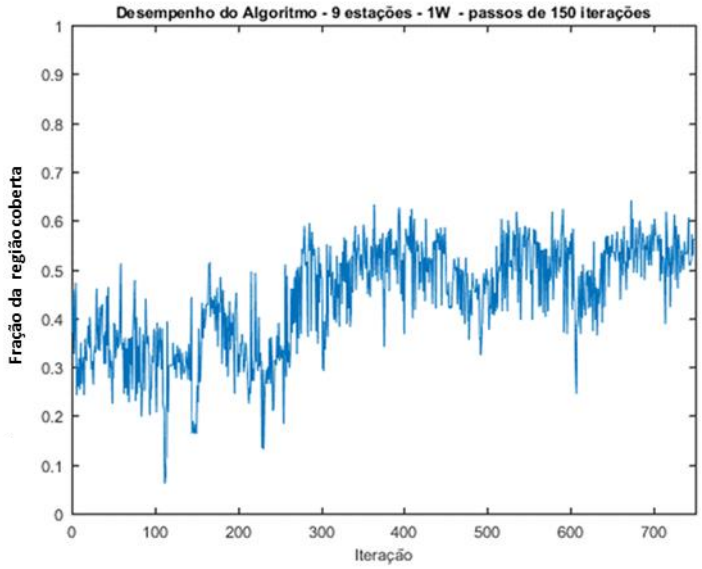

Figura 84 - Gráfico da evolução do algoritmo para uma rede de nove estações na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 1 W.

Pode-se observar nos gráficos uma região de aprendizado mais instável em torno de 300 a 400 iterações, que assim como no caso de teste, diminui conforme aumentamos o números de estações da rede SFN que será alocada na região. Esse comportamento pode ser observado em todos os casos testados.. Para efeito de

comparação, as curvas para estações com potência de 10 W são apresentadas na Figura 85 até a Figura 89.

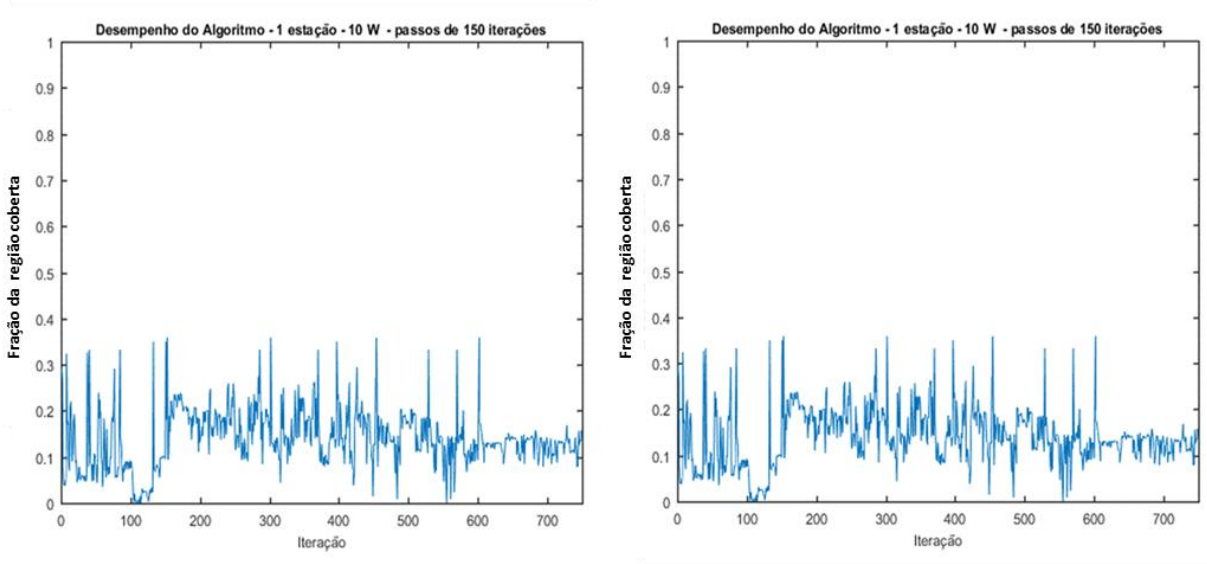

Figura 85 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W.

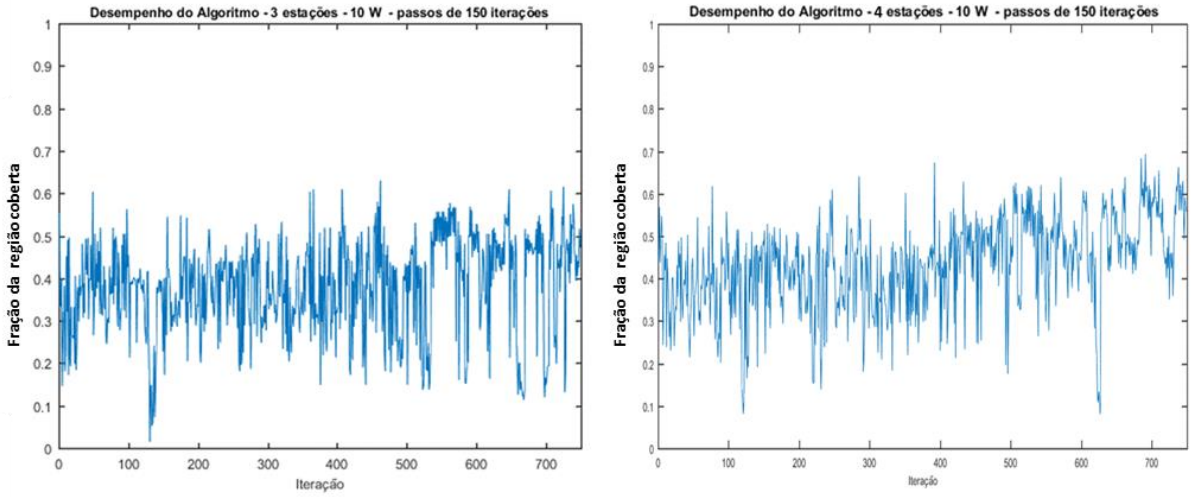

Figura 86 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W.

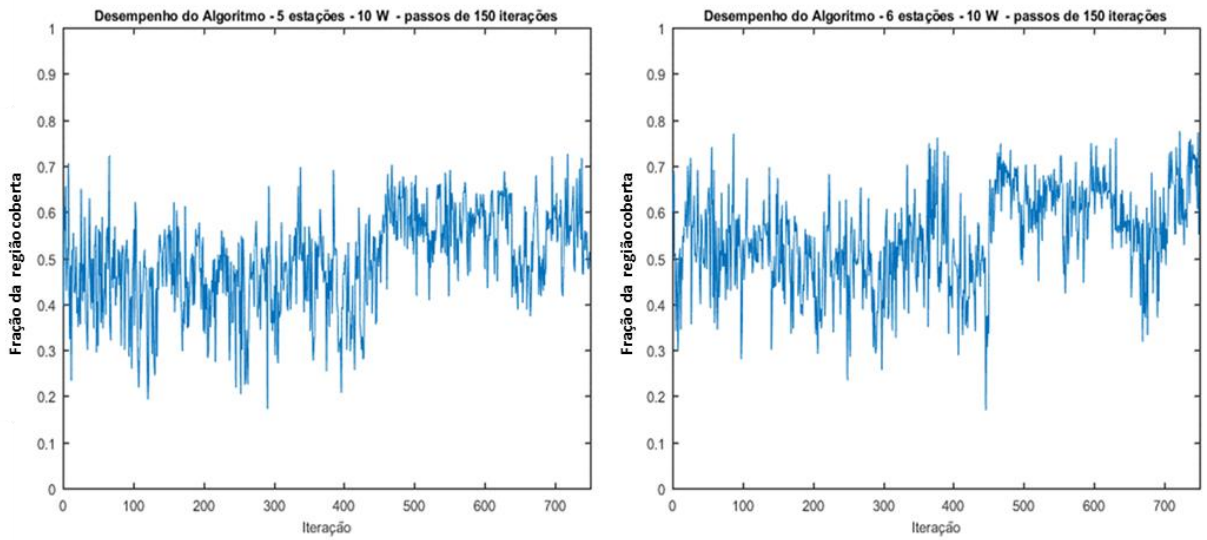

Figura 87 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de cinco estações (esquerda) e seis estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W.

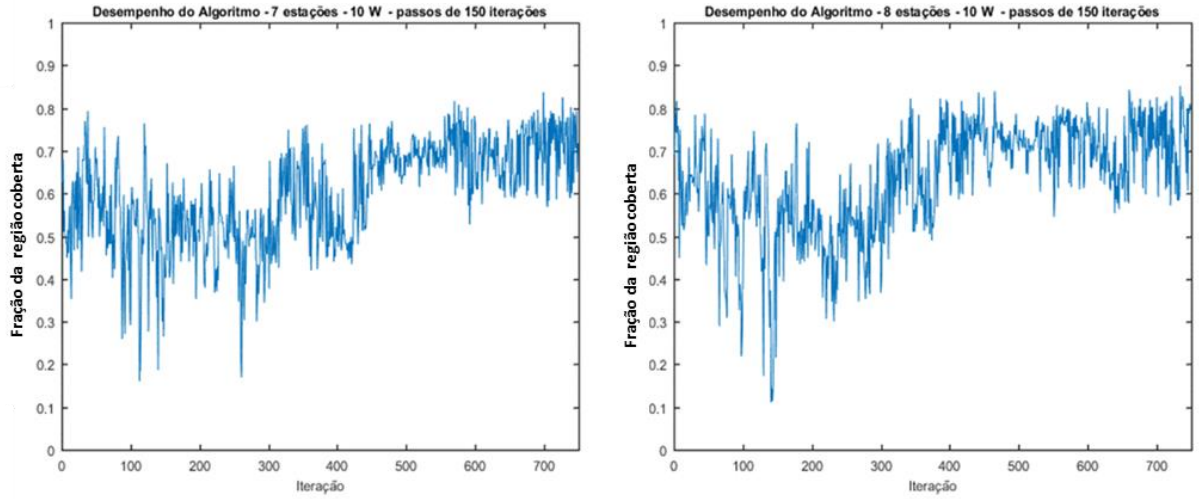

Figura 88 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de sete estações (esquerda) e oito estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W.

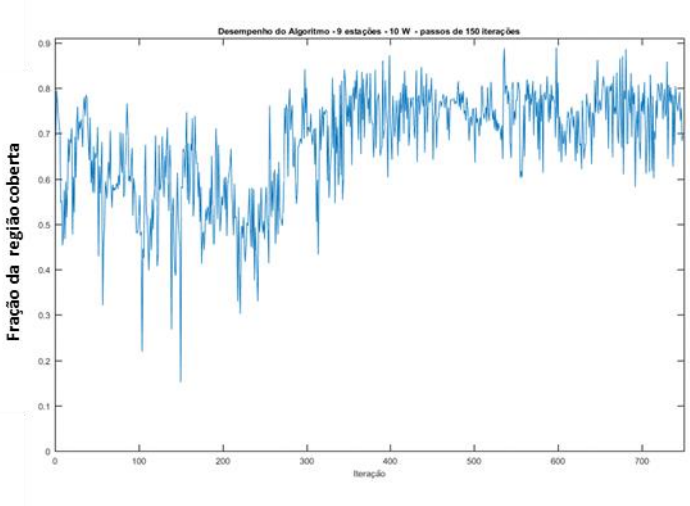

Figura 89 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de nove na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 10 W.

Fez-se também todas as buscas novamente, mas desta vez utilizando estações com potência EIRP de 100 W. O método foi utilizado em SFNs de 1 a 4 estações, pois com 4 estações os resultados já se aproximam do total atendimento da RI, ou a completude de cobertura. Esses resultados podem ser observados na Figura 90 e na Figura 91.

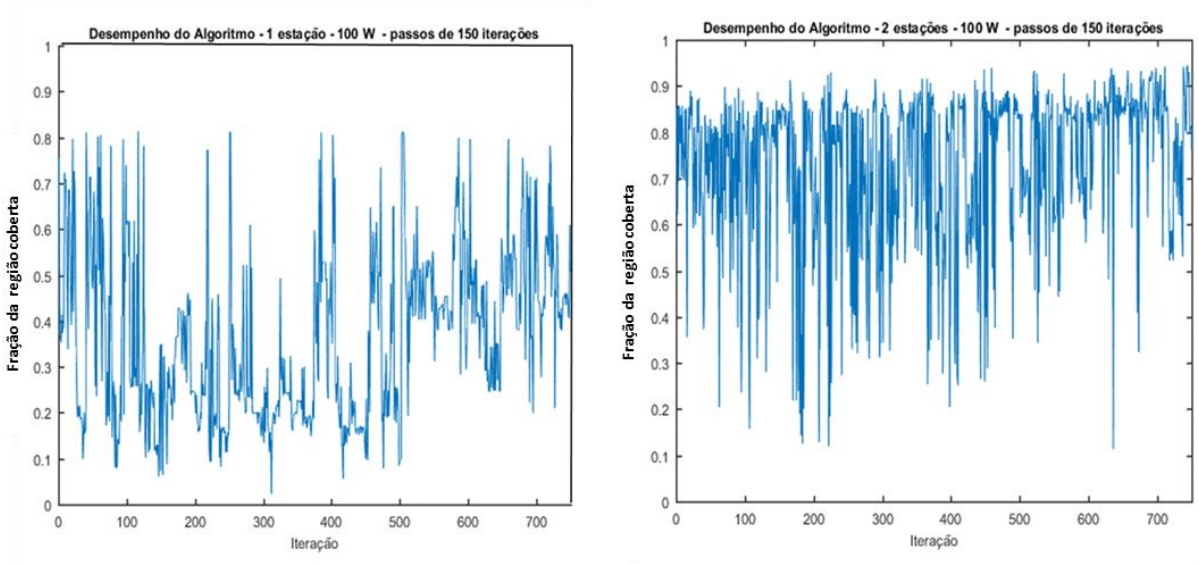

Figura 90 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de uma estação (esquerda) e duas estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 100 W.

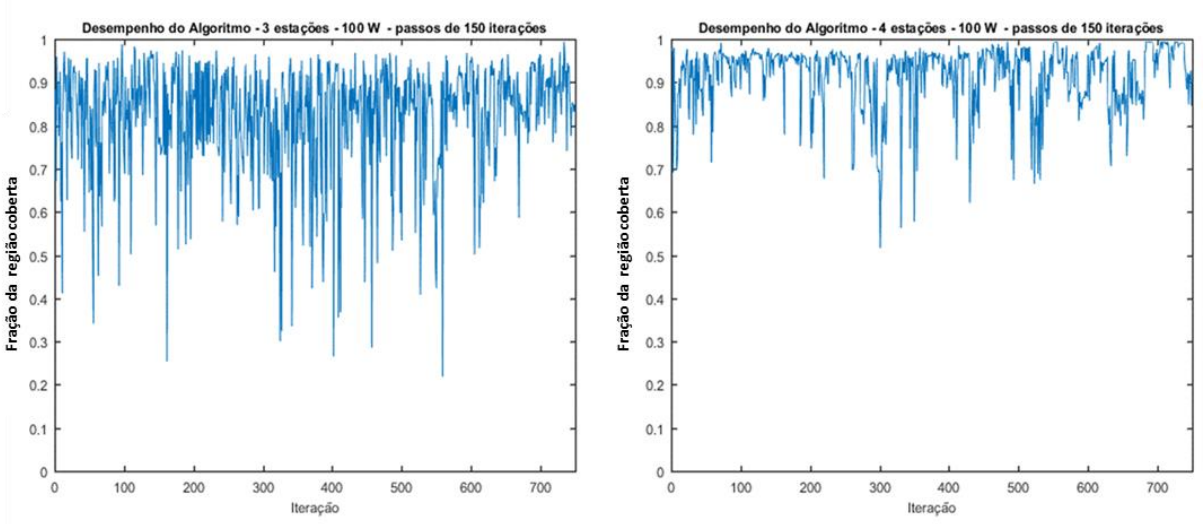

Figura 91 - Gráficos da evolução do algoritmo para uma rede de três estações (esquerda) e quatro estações (direita) na região de interesse de Queimados utilizando potência de transmissão de 100 W.

Observa-se pelos gráficos que, como uma única estação transmissora já consegue cobrir 80 % da RI, o método tem dificuldade em alocar as estações para, ao mesmo tempo, evitar a sobreposição de cobertura e obter a maior cobertura na RI. Nesses casos, seria necessário incrementar o método com uma tomada de decisão quanto à potência de transmissão e diagrama de radiação utilizados.

Nas Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 são armazenados o melhores resultados dada a utilização dos r % centroides mais altos máximos. O algoritmo foi executado até que em alguma das execuções seja alcançada uma cobertura superior à 99 %, onde pode-se considerar a região totalmente atendida.

Tabela 23 – Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados na região de Queimados para estações de 1 W

T	20%		40%		60%		80%		100%	
	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)
1	92	16,18	155	16,18	304	16,18	569	16,18	603	**15,59**
2	91	24,88	240	26,5	364	29,32	452	31,38	636	**31,70**
3	99	34,37	211	33,78	342	30,06	507	44,22	746	**35,75**
4	55	38,61	272	39,71	440	44,22	502	48,11	705	**48,74**

5	55	41,83	227	44,00	383	45,85	485	48,34	641	**48,98**
6	64	43,44	182	47,12	338	48,92	596	54,42	602	**56,43**
7	95	47,70	178	52,98	444	**61,00**	568	57,87	710	60,21
8	57	45,42	162	49,53	373	61,38	561	**68,50**	726	66,13
9	59	51,13	286	59,33	364	63,06	591	62,43	673	**63,97**

Tabela 24 - Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados na região de Queimados para estações de 10 W

T	20%		40%		60%		80%		100%	
	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)
1	133	34,84	153	**35,78**	302	**35,78**	454	**35,78**	602	**35,78**
2	98	**57,09**	155	49,88	350	52,19	540	54,72	633	50,82
3	49	60,24	175	54,74	407	60,89	462	**62,80**	725	61,52
4	77	61,82	285	64,19	392	67,35	571	63,85	691	**69,13**
5	66	72,17	293	65,46	338	69,43	468	70,21	718	**72,52**
6	87	76,92	223	68,15	377	76,18	596	74,84	722	**77,53**
7	38	79,30	153	67,01	447	76,33	570	81,46	699	**83,46**
8	4	81,52	178	76,51	442	83,72	465	83,96	734	**85,02**
9	2	79,52	298	84,00	399	87,19	598	**88,91**	681	88,53

Tabela 25 - Desempenho de cobertura na iteração de estagnação por quantidade de transmissores e porcentagem de centroides utilizados na região de Queimados para estações de 100 W

T	20%		40%		60%		80%		100%	
	I	P(%)	I	P	I	P	I	P	I	P
1	41	**81,10**	252	**81,10**	385	**81,10**	505	**81,10**	659	79,58
2	71	89,81	225	92,85	448	93,62	459	**93,84**	633	93,71
3	97	98,88	233	97,44	433	96,73	483	96,63	734	**99,23**
4	72	98,92	232	97,53	414	98,37	484	99,35	685	**99,39**

Compilando os resultados apresentados, pode-se observar o comportamento do método de maneira mais ampla. Ela apresenta a iteração em que o método obteve o melhor resultado. Pode-se observar que o método consegue ampliar a cobertura conforme incrementa-se o número de estações da SFN.

Tabela 26 – Desempenho de cobertura do Algoritmo 5 no município de Queimados, todos os casos de estudo

	1 Tx		2 Tx		3 Tx		4 Tx		5 Tx	
EIRP	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)
1 W	92	16,18	636	31,79	507	44,22	795	48,74	641	48,98
10 W	153	35,78	98	57,09	462	62,80	691	69,13	718	72,52
100 W	41	81,10	459	93,71	734	99,23	685	99,39	-	-

	6 Tx		7 Tx		8 Tx		9 Tx	
EIRP	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)	I	P(%)
1 W	602	56,43	444	61,00	561	68,50	673	63,97
10 W	722	77,53	699	83,46	734	85,02	681	88,53
100 W	-	-	-	-	-	-	-	-

Após analisar as curvas de evolução do algoritmo e os melhores desempenhos podemos analisar o seu comportamento. Para o caso de Queimados pode-se observar um comportamento semelhante ao da simulação na região de teste na Seção 7.1, mesmo com a geometria da RI e o relevo, tanto em caracterização quanto nas dimensões, que são razoavelmente diferentes, portanto conclui-se que a implementação possui um comportamento consistente.

Se considerados os pontos da curva no último passo da otimização, pode-se mapear candidatos ótimos para o atendimento da região em questão e a partir desses pontos, averiguar as demais condições que influenciam na instalação de uma estação de telecomunicações, tais como questões econômicas e regulatórias.

É importante notar que, apesar do algoritmo obter resultados satisfatórios rapidamente se comparado a uma busca por força bruta, é difícil estimar o número de iterações necessárias para se obter o resultado esperado, pois esse número depende de muitos fatores; que incluem: tamanho do relevo de entrada, tamanho e geometria da RI, quantidade de máximos regionais e quantidade de estações na SFN. Apesar disso, como todas as operações no processo iterativo podem ser

consideradas simples, o mesmo não será muito custoso, deixando grande parte do tempo computacional utilizado por conta do modelo de propagação.

7.3 Complexidade do Algoritmo

Usando o algoritmo apresentado no Capítulo 6, a quantidade de estações transmissoras necessárias para o atendimento de uma região de interesse é de difícil determinação a priori, pois depende de vários fatores, tais como o relevo, a potência de cada um dos transmissores e a geometria da região. Quanto maior a quantidade de estações transmissoras, mais complexo fica o algoritmo, pois a quantidade de iterações necessárias para a obtenção de bons resultados também aumenta, conforme visto anteriormente. Ao determinar o grau de complexidade desse algoritmo e compará-lo com a quantidade de testes necessários para se determinar todos os possíveis casos, podemos estimar o ganho derivado do emprego da heurística proposta.

7.3.1 Busca por força bruta

Para se determinar a complexidade total da busca pela melhor configuração de estações, devemos considerar as dimensões do relevo de entrada e também da RI. Assume-se Z máximos regionais do relevo de entrada com T transmissores iguais, assim temos uma combinação de T elementos dentre Z máximos

$$C_{T,N} = \frac{Z!}{T!\,(Z-T)!}. \tag{70}$$

Essa é a quantidade de possíveis combinações de transmissores pela área considerada. Em cada uma dessas combinações, deve-se avaliar o sinal recebido nas M células de cada um dos T transmissores (T coberturas ponto-multiponto). Assim, faz-se

$$TMC_{T,N} = \frac{TMZ!}{T!\,(Z-T)!} \tag{71}$$

avaliações do modelo de propagação.

Podemos assumir a Equação (72) como a complexidade de busca não otimizada, restringindo somente a busca a uma fração $0 < r \leq 1$ dos pontos N em função das aturas.

$$CompTotal(r) = TMC_{T,r\cdot N} = \frac{TM(rZ)!}{T!\,((rZ)-T)!} \tag{72}$$

Cada cálculo do modelo de propagação implica mesma complexidade computacional. Não iremos aqui nos restringir ao modelo ITU-R P.1546, mas assim iremos considerar um modelo genérico de complexidade O. Assim, a complexidade total é

$$CompTotal(r)O = TMC_{T,r\cdot N}O = \frac{TM(r\cdot Z)!}{T!\,\big((rZ)-T\big)!}O. \tag{73}$$

Aplicando-se este raciocínio à superfície de teste da Seção 7.1, cujas características estão apresentadas na Tabela 27, podemos calcular e obter a complexidade $CompTotal$ em função de O. A Figura 92 apresenta a variação da complexidade em função da quantidade de transmissores testados na SFN e o percentual de pontos testados e a Tabela 28 apresenta os valores de $CompTotal$ para 100% dos pontos testados em múltiplos de O.

Tabela 27 – Valores utilizados de r, Z e M para o cálculo da complexidade da busca por força bruta

r (% centroides na RI)	Z	M
20	544	250000
40	585	
60	627	
80	668	
100	799	

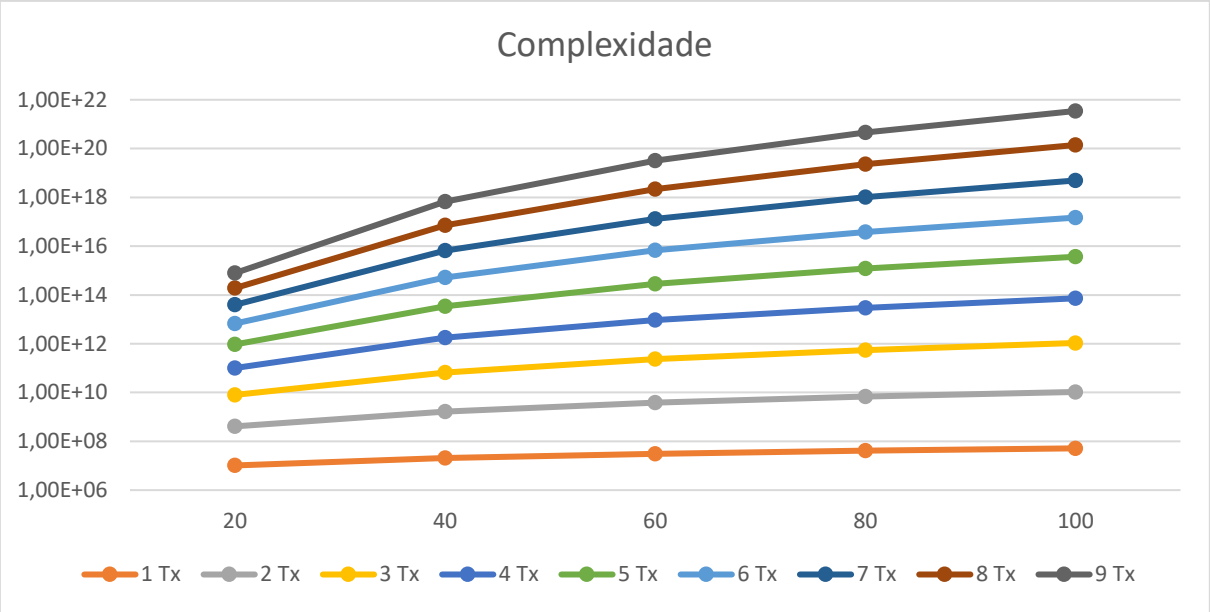

Figura 92 – Curvas de complexidade de busca do algoritmo ao utilizar todas as possibilidades de busca para a variação da quantidade de transmissores de 1 a 9.

Tabela 28 – Valores para $CompTotal$ de acordo com a quantidade de estações testadas na SFN

T	$CompTotal$
1	5,15E+07
2	1,06E+10
3	1,08E+12
4	7,29E+13
5	3,68E+15
6	1,48E+17
7	4,93E+18
8	1,40E+20
9	3,47E+21

7.3.2 Busca proposta

O processo heurístico proposto na Seção 6.2 visa obter a configuração adequada a uma complexidade menor. Cada configuração de T transmissores nas M

células tem complexidade $CompTotal$. Porém, o algoritmo visa orientar a busca e não realizar a quantidade de comparações envolvidas na busca total, sendo assim mais eficiente, para isso avaliam-se outros aspectos. Veremos a seguir os custos envolvidos na execução de cada um.

- $\boldsymbol{PS}$: calcula-se a norma das alturas e seu logaritmo para os M pontos da RA, que significa região da antenas, todos os pontos estudados para posicionar as antenas ou estações da SFN, neste caso são todos os M pontos do relevo de entrada,

$$C_{PE} = \#RA = M \tag{74}$$

- $\boldsymbol{P_d}$: calcula-se a norma para os M pontos da RA a partir do centroide dada a forma da região de interesse RI, que possui P pixels

$$C_{Pd} = \#RA\#RI = MP \tag{75}$$

- $\boldsymbol{P_{cob}}$: para cada um dos T transmissores em cada uma das t iterações do método é usado o modelo de propagação de complexidade

$$C_{pcob} = tMTO \tag{76}$$

- $\boldsymbol{PCRI}$: para cada um dos T transmissores nas t iterações é calculada a distância a uma quantidade (fração) r dos centroides localizados na RI e assim, determina-se os centroides mais próximos de cada estação e as superfícies individuais de aproximação de cada estação transmissora:

$$C_{Pc} = tTr\#RI = tTZ \tag{77}$$

- RegiaoBusca: faz-se com combinações dois a dois das estações mais a complexidade $O2$ nas t iterações, dada pelo cálculo de RB apresentado no Seção 6.2.5.

$$C_{RB} = tT\frac{T-1}{2}O2 \quad (78)$$

- Variável aleatória: gera-se a cada iteração uma distribuição de Z valores, considerando os centroides. Assumimos uma complexidade $O3$ para cada, assim:

$$C_{VA} = tr\#RI = tZO3 \quad (79)$$

- Combinação das superfícies: é a Equação (67), calculada a partir das somas das superfícies a cada iteração.

$$C_{Cmb} = t4r\#RI = t4Z \quad (80)$$

- Ordenamento e escolha: faz a ordenação (*sort*) dos candidatos após a soma de todas as superfícies para escolha do maior valor dentre os mesmos.

$$C_{sort} = tr\#RITlog_{10}T = tZTlog_{10}T \quad (81)$$

Somando todas as parcelas acima, podemos estimar a complexidade final do método.

$$C_{Total} = C_{PE} + C_{PD} + C_{pcob} + C_{Pc} + C_{RB} + C_{VA} + C_{Cmb} + C_{sort}. \quad (82)$$

Utilizando os mesmos valores da Tabela 27 mais a quantidade de iterações da execução do caso de teste apresentado na Tabela 20 da Seção 7.1.1, podemos estimar a complexidade do método estudado. Como a ordem de grandeza é superior aos demais componentes de C_{Total}, iremos levar em conta apenas essa parcela mais significativa para estimar complexidade C_{pcob}, estimada através da Equação (76). Como na Equação (73) esta também é colocada em função da complexidade do modelo de propagação O. A Figura 93 mostra os valores de complexidade para os diversas quantidades de estações e fração de centroides utilizados.

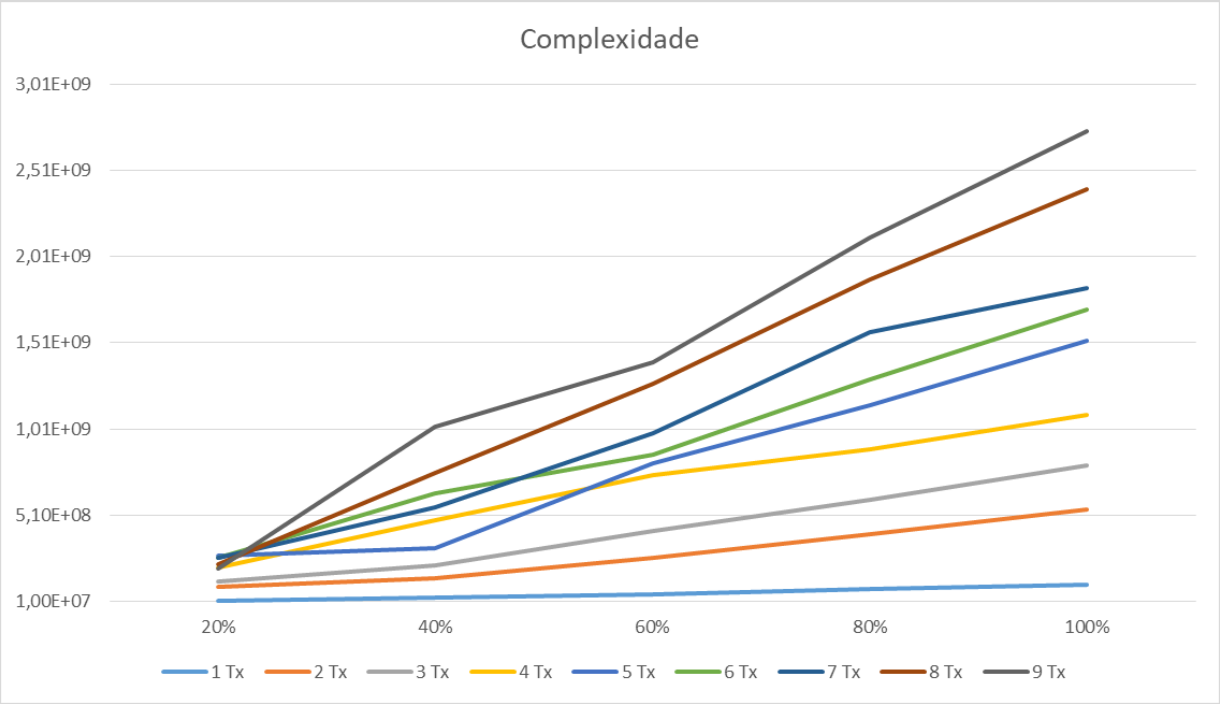

Figura 93 - Curvas de complexidade de busca do algoritmo definido na seção 6.2 para a variação da quantidade de transmissores de 1 a 9.

Observa-se que o algoritmo elaborado pode ser em até $1{,}2 \cdot 10^{12}$ vezes menos complexo se comparado à busca exaustiva.

8 CONCLUSÃO

Considerando a possível adoção de tecnologias MIMO (Multiple Input Multiple Output) para a radiodifusão de televisão digital em resolução 8K, esta dissertação apresentou resultados experimentais de um sistema de transmissão MIMO OFDM (Otrhogonal Frequency Division Multiplexing) 4096 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) em ambiente urbano. Os dados experimentais permitiram comparar as atenuações medidas nas polarizações horizontal e vertical, quando foram observas pequenas diferenças. Nota-se que o conjunto de medidas realizadas na polarização vertical são ligeiramente superiores, com potência média recebida de -49 dBm e variância de 72 dBm², enquanto dados das medidas na polarização horizontal apresentam potência média de 51 dBm e variância de 75 dBm^2.

De forma a contribuir com projetos de tais sistemas, a cobertura de sistemas de radiodifusão, os dados experimentais foram empregados para otimizar (sintonizar) os parâmetros do modelo de propagação ITU-R P.1546; para isso, utilizou-se os métodos gradiente descendente e Newton-Raphson de forma a encontrar conjuntos de parâmetros que minimizavam o erro médio quadrático entre a perda de percurso prevista pelo modelo e a medida. Essa otimização foi realizada nas polarizações horizontal e vertical isoladamente e conjuntamente. Como resultado foram conjuntos de parâmetros que conferem maior acurácia ao modelo ITU-R P.1546. Técnicas de validação mostraram que esses ganhos de acurácia são consistentes com ganhos de 2,83 dB de erro médio e 9,64 dB de máximo ao utilizar o gradiente descendente e ganhos de 3,92 dB de erro médio e 9,64 dB de erro máximo com Newton Raphson.

A seguir, considerou-se o projeto de cobertura de redes de frequência única (SFN - *Single Frequency Network*). Propôs-se um algoritmo iterativo que emprega heurísticas para a obter posições adequadas para estações de forma a cobrir uma região de interesse com um patamar predeterminado do sinal da SFN. O modelo de propagação sintonizado é empregado para prever as coberturas das estações transmissoras da SFN nesse algoritmo. No algoritmo proposto, a partir da cobertura obtida, heurísticas orientam a busca buscar por configurações do sistema, posições das antenas da SFN, que melhorem o desempenho. As heurísticas consideram informações de relevo e a sobreposição de coberturas entre diferentes estações transmissoras. O algoritmo proposto é iterativo e como resultado final fornece uma

quantidade de transmissores e suas localizações de forma a atender uma região satisfazendo um patamar de intensidade de sinal. Para a simplificação do problema foram assumidas premissas: todas as estações possuem mesma EIRP e diagramas de radiação omnidirecionais, que todos os sinais estão respeitando a relação de guarda. Métodos que visem resolver o mesmo problema podem ser bastante custosos. A heurística proposta permite simplificar a busca por configurações viáveis de estações, fazendo com que a velocidade de execução dependa basicamente da complexidade do modelo de propagação. Avaliou-se a redução do custo computacional do algoritmo proposto frente a busca exaustiva, mostrando um grande ganho. Diversos exemplos do comportamento do algoritmo proposto foram apresentados. Inicia-se a busca com um estação que é incrementado caso não se alcance o critério de solução. O algoritmo foi testado com conjuntos de até nove estações que, em uma das regiões testadas, apresentou redução de complexidade da ordem de até 10^{12} se comparado à busca por força bruta.

Resumidamente, esta dissertação abordou como melhorar e facilitar o projeto de sistemas de radiodifusão, principalmente de SFNs, na faixa de UHF. Os resultados foram bastante promissores, pois a otimização dos parâmetros do modelo ITU R-P.1546 melhora a acurácia da predição de cobertura do mesmo. E, a heurística proposta permite obter posições candidatas viáveis para a implementação de SFNs, que devem ser submetidas posteriormente a *survey*. Os resultados apresentados comprovam a validade dos métodos propostos e suas contribuições para o desenvolvimento e melhora na elaboração de projetos de radiodifusão. Seu desenvolvimento pode ser utilizado em conjunto com outros métodos e assim facilitar as melhores práticas de projeto.

A otimização do conjunto de parâmetros do modelo de propagação ITU-R P.1546 apresentou bons resultados na melhora da acurácia. Mais medidas de campo podem melhorar ainda mais a acurácia do modelo.

Como possíveis melhorias ao método de projeto de SFNs pode-se incorporar diferentes EIRPs, diagramas de radiação nas antenas da SFN e incluir os atrasos relativos entre os sinais provenientes de diferentes antenas na busca heurística. Uma abordagem para reduzir ainda mais o custo computacional que pode ser incorporada é a redução da quantidade de pontos da região de cobertura para as quais o modelo de propagação deve ser avaliado, utilizando condições de monotonicidade da perda de percurso em função da distância, tornando assim a

execução do modelo de propagação mais rápida e diminuindo a complexidade do método. Pode-se ainda incluir a avaliação de regiões de cobertura exclusiva consideravelmente difícil durante a execução do método, como também incluir uma margem de recepção na região considerada. Com a reunião desses outros aspectos pode-se criar uma ferramenta altamente especializada para o auxílio do projetista de coberturas de TV Digital e também de outros serviços de radiodifusão.

Um desdobramento possível da otimização de SFNs proposta é sua aplicação ao projeto de redes 4G que empregam a técnica de acesso múltiplo OFDMA, similar em estrutura ao OFDM.

REFERÊNCIAS

[1] International Telecomunications Union (ITU), “ITU-R BT.2343-2: Collection of field trials of UHDTV over DTT networks,” Geneva, 2016.

[2] M. Tagguchi, K. Murayama, T. Shitomi, S. Asakura e K. Shibuya, “Field experiments on dual-polarized MIMO transmission with ultra-multilevel OFDM signals toward digital terrestrial broadcasting for the next generation,” *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB),* p. 5, 8 - 10 junho 2011.

[3] Operating Eurovision and Euroradio, “Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2,” Geneva, 2014.

[4] Advanced Television Systems Committee (ATSC), “ATSC Standard: ATSC 3.0 System,” Washington, 2017.

[5] E. Nakasu, “Super Hi-Vision on the Horizon: A Future TV System that Conveys an Ehanced Sense of Reality and Presence,” *IEEE Consumer Eletronics Magazine,* vol. 1, nº 2, pp. 36-42, 2012.

[6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), “ABNT NBR 15601: Televisão DIgital Terrestre - Sistema de Transmissão,” Rio de Janeiro, 2008.

[7] International Telecommunications Union (ITU), “ITU-R P.1546-5: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz,” Geneva, 2013.

[8] International Telecommunications Union (ITU), “ITU-R P.1546-0: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz,” Geneva, 2001.

[9] K. Paran, N. Noori, “Tuning of the Propagation Model ITU-R P.1546 Recommendation,” *Progress In Electromagnetics Research B,* vol. 8, pp. 243-255, 2008.

[10] M. Yang e W. Shi, “A Linear Least Square Method of Propagation Model Tuning for 3G Radio Network Planning,” *Fourth International Conference on Natural Computation,* 18-20 10 2008.

[11] P. K. Sharma, D. Sharma e T. V. Sai, “Optimization of Propagation Path Loss

Model in 4G Wireless Communication Systems," *Proceedings of the Second International Conference on Inventive Systems and Control,* 19-20 01 2018.

[12] F. Kiichen; , T. C. Becker; , W. Wiesbeck, "Optimizing the Coverage Area of Single Frequency Networks," *International Broadcasting Convention,* pp. 236-241, 12-16 setembro 1996.

[13] "Genetic Algorithm Approach for Dynamic Configuration of Multicast Broadcast Single Frequency Network Deployment in LTE," *Proceedings of the 5th International Conference on IT & Multimedia at UNITEN (ICIMU 2011),* pp. 1-5, 14-16 novembro 2011.

[14] M. Lanza, A.L Gutiérrez, I. Narriuso, J.R. Pérez, M. Domingo, L. Valle, J. Basterrechea, J. Morgade, P. Angueira, "Optimization of single frequency networks for DVB-T Services using SA and PSO," *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP),* pp. 2789-2792, 11-15 abril 2011.

[15] S. Russell e P. Norvig, "Inteligência Artificial," Rio de Janeiro, Elsevier , 2013, pp. 95-146.

[16] Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), "ARIB STD – B31: Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting," Tokyo, 2005.

[17] S. C. Kurashima, M. G. De Biase, C. L. De Paula Costa, R. A. Herrero e K. M. Zuffo, "A Technical Analysis of Digital Television Broadcasting in Brazil," *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB),* p. 5, 5-7 junho 2013.

[18] Rohde & Schwarz, "Introduction to MIMO: Aplication Note," Munique, 2009.

[19] S. Saito, T. Shitomi, S. Asakura, K. Tsuchida, T. Saito e K. Shibuya, "Technology for next-generation digital terrestrial broadcasting — Field experiments of 8K Super Hi-Vision transmission using dual-polarized MIMO and ultra-multilevel OFDM," *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB),* pp. 1-6, 25-27 agosto 2014.

[20] W. Fischer, "Digital Television: A Practical Guide for Engineers," Munique, Springer, 2004, pp. 323-326.

[21] W. Liu e S. Weiss, Wideband Beamforming: Concepts and Techniques, Wiley, 2010.

[22] S. Saito, T. Shitomi, S. Asakura, A. Satou, M. Okano, K. Murayama e K. Tsuchida, “8K Terrestrial Transmission Field Tests Using Dual-Polarized MIMO and Higher-Order Modulation OFDM,” *IEEE Transactions on Broadcasting,* vol. 62, nº 1, pp. 306-315, 2016.

[23] I. Gaspard, “Polarization Properties of the Indoor Radio Channel,” *2015 IEEE International Conference on Microwaves Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS),* pp. 1-5, 2-4 novembro 2015.

[24] IF Telecom, “Catálogo IF Telecom - Slot Cavidade,” 2017. [Online]. Available: http://www.iftelecom.com.br/wp-content/uploads/2017/01/Antena-slot-Cavidade-UHF_2017-1.pdf. [Acesso em 2018].

[25] Operating Eurovision and Euroradio, “TR24: SFN FREQUENCY PLANNING AND NETWORK IMPLEMENTATION WITH REGARD TO T-DAB AND DVB-T,” Geneva, 2005.

[26] F. Rossi; , S. Smriglio; , A. Assano, “Models and Algorithms for Terrestrial Digital Broadcasting,” *Annals of Operations Research,* vol. 107, pp. 267-283, 2001.

[27] C. Fragoas Fernandez Rodrigues, F. de Assis Peres e L. Lovisolo, “Receivers Behavior in a ISDB-T’s Single Frequency Network,” *SET JBBE - SET International Journal of Broadcast Engineering,* vol. 2, nº 1, pp. 44-54, 2016.

[28] Instituto MIlitar de Engenharia, “A Técnica de Transmissão OFDM,” *Revista Científica Periódica - Telecomunicações,* vol. 5, nº 1, pp. 1 - 10, 2002.

[29] R. V. Nee e R. Prasad, “OFDM for Wireless Multimedia Communications,” Boston, Artech House, 2000, pp. 33-42.

[30] International Telecommunications Union (ITU), “ITU-R P.370-7: VHF AND UHF PROPAGATION CURVES FOR THE FREQUENCY RANGE FROM 30 MHz TO 1 000 MHz,” Geneva, 1995.

[31] Anatel, “Resolução nº 398,” Diário Oficial da União, Brasília, 2005.

[32] A. W. Graham, N. C. Kirkman e P. M. Paul, “Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands: A Practical Approach,” Chichester, Jon Wiley and Sons, 2007, pp. 82-85.

[33] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling e B. P. Flannery, “Numerical Recipes: The art of Scientific Computing,” Cambridge, Cambridge University Press, 2007, pp. 320-336.

[34] International Telecommunications Union (ITU), “ITU-R P.1812-4: A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands,” Geneva, 2015.

[35] S. Asakura, H. Miyasaka, K. Murayama, K. Tsuchida, C. Rodrigues e G. Ferraresso, “Performance of dual-polarized MIMO-high-order-modulation OFDM in deteriorated transmission channel,” *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB),* p. 4, 7-9 junho 2017.

[36] D. A. Belsley, E. Kuh e R. E. Welsch, “Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity,” Nova Jersey, John Wiley & Sons, 2004, pp. 100-105.

[37] D. Tse e P. Viswanath, “Fundamentals of Wireless Communication,” Cambridge, Cambridge University Press, 2005, pp. 172-179.

[38] K. Paran; Noori, N., “Tuning the Propagation Model ITU-R P.1546 Recommendation,” *Progress In Electromagnetics Research B,* vol. 8, pp. 243-255, 2008.

[39] A. Antoniou e W.-S. Lu, “Pratical Optimization,” em *Algorithms and Engineering Applications*, Colúmbia Britânica, Springer, 2007, pp. 119-140.

[40] A. Cauchy, “ Méthode générale pour la resolution des systems d’équations simultan ées,” *Comp. Rend. Sci Paris,* pp. 536-538, 1847.

[41] C. Lemaréchal, “Cauchy and the Gradient Method,” *Documenta Mathematica,* vol. Volume extra, pp. 251-254, 2012.

[42] Jon Rogawski; , Colin Adams, “Cálculo: Volume 2,” Porto Alegre, Bookman, 2018, pp. 774-775.

[43] Yu-Hong; Zhang, HongChao, “Adaptive two-point stepsize gradient algorithm,” *Numerical Algorithms,* vol. 27, pp. 377-385, 2001.

[44] I. Newton, Analysis per quantitatum series, fluxiones, A C differentias cum enumeratione linearum tertii ordinis, Londres: ex officina Pearsoniana, 1711.

[45] J. Raphson, Analysis Aequationum universalis, typis T. B. prostant venales apud A. & I. Churchill, 1702.

[46] T. J. Ypma, “Historical Development of the Newton-Raphson Method,” *SIAM Review,* vol. 37, nº 4, pp. 531-551, 1995.

[47] S. M. Goldfield, R. E. Quandt e H. F. Trotter, “Maximization by Quadratic hill-climbing,” *Econometrica,* vol. 34, nº 3, pp. 541-551, 1966.

[48] C. Rodrigues, L. Muratori e L. Lovisolo, “Tuning the ITU-R P.1546 Model in a MIMO Environment,” *IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM),* pp. 1-6, 8-10 novembro 2017.

[49] A. Graham, “Communications, Radar and Electronic Warfare,” Chichester, John Wiley & Sons, 2011, p. 20.

[50] H. Selvidge, “Diffraction Measurements at Ultra-High Frequencies,” *Proceedings of IRE,* vol. 29, nº 1, pp. 10-16, 1941.

[51] A. C. Rencher e W. F. Christensen, “Methods of Multivariate Analysis,” John Wiley & Sons, 2012, pp. 309-310.

[52] E. Dougherty, “Digital Image Processing Methods,” Nova York, Marcel Dekker, 1994, pp. 71-74.

[53] INPE, “TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil,” 2009. [Online]. Available: http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php.

[54] IBGE, “IBGE: Malhas territoriais 2010,” 2010. [Online]. Available: https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html.

[55] K. Murayama, M. Taguchi, T. Shitomi, H. Hamazumi e K. Shibuya, “Experimental Evaluation of Dual Polarized Yagi Antenna,” *ITE Annual Convention,* p. 2, 1-2 setembro 2010.