



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS SOBRAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FRANCISCO LEONARDO ROCHA COSTA**

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS E TÉCNICAS DE  
GEOPROCESSAMENTO EM PYTHON NO POSICIONAMENTO DE RÁDIO  
ENLACES PONTO A PONTO**

**SOBRAL-CE**

**2025**

FRANCISCO LEONARDO ROCHA COSTA

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS E TÉCNICAS DE  
GEOPROCESSAMENTO EM PYTHON NO POSICIONAMENTO DE RÁDIO ENLACES  
PONTO A PONTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
*CAMPUS SOBREAL* da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Josefran  
de Oliveira Bastos.

SOBRAL-CE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C872a Costa, Francisco Leonardo Rocha.  
Aplicação de algoritmos bioinspirados e técnicas de geoprocessamento em Python no posicionamento de rádio enlaces ponto a ponto / Francisco Leonardo Rocha Costa. – 2025.  
131 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Antonio Josefran de Oliveira Bastos.
1. Algoritmos bioinspirados. 2. Python. 3. Enlaces de rádio. 4. Geoprocessamento. 5. Otimização. I. Título.

CDD 621.3

---

FRANCISCO LEONARDO ROCHA COSTA

APLICAÇÃO DE ALGORITMOS BIOINSPIRADOS E TÉCNICAS DE  
GEOPROCESSAMENTO EM PYTHON NO POSICIONAMENTO DE RÁDIO ENLACES  
PONTO A PONTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
*CAMPUS SOBRAL* da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 14/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antonio Josefran de Oliveira  
Bastos (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Helena, que sempre me encorajou nos estudos e a ser uma pessoa melhor. Sei que onde quer que você esteja, está orgulhosa e feliz por mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, especialmente à minha mãe, Helena, e ao meu pai, Expedito, que mesmo não estando mais entre nós, se fazem presentes em forma de amor, inspiração e saudade. Agradeço às minhas irmãs, pelo apoio e amparo nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Josefran de Oliveira, pela orientação e paciência nessa jornada repleta de desafios.

Agradeço a todos os meus amigos, que além de me apoiarem, acreditaram no meu potencial e me encorajaram a chegar até aqui.

"O que lhe torna incrível é que você viajou para  
fora desse coma em que todos nós vivemos."  
(The OA.)

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e comparar modelos de otimização para o posicionamento de antenas em múltiplos enlaces de rádio, levando em consideração aspectos geográficos, de cobertura, interferências e outros fatores que impactam o desempenho das redes de telecomunicações. Para a implementação, foi selecionada a região compreendida entre as cidades de Sobral e Massapê, representando, respectivamente, as áreas transmissora e receptora. A análise geográfica foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento, utilizando o *software* Python para a extração dos dados necessários à avaliação das combinações de enlaces. A metodologia proposta fundamenta-se na aplicação e parametrização de algoritmos bioinspirados – especificamente, *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Firefly Algorithm* (FA), *Biogeography-Based Optimization* (BBO) e *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) – que foram comparados com uma abordagem randômica através do *software* Matlab, com o intuito de evidenciar suas respectivas eficiências. Para garantir a robustez dos resultados, adotou-se um procedimento de repetições de Monte Carlo (MC), o que possibilitou uma avaliação estatística consistente dos custos computacionais e da qualidade das soluções obtidas. Os resultados demonstraram que, embora os algoritmos bioinspirados apresentem, em alguns casos, tempos de execução superiores, eles geram soluções com custo médio significativamente inferior às obtidas pela técnica randômica. Adicionalmente, realizou-se uma comparação entre as meta-heurísticas baseadas em Inteligência de Enxames, como o PSO e FA, e aquelas fundamentadas em Computação Evolucionária, a exemplo do BBO e NSGA-II. Essa análise evidenciou a necessidade de ponderar a escolha da abordagem conforme a aplicação específica: enquanto os métodos baseados em Inteligência de Enxames tendem a produzir soluções mais robustas, ainda que a um custo computacional elevado, as técnicas de Computação Evolucionária – especialmente o BBO – revelam-se vantajosas quando há restrições quanto ao tempo de parametrização, mesmo que os resultados sejam mais modestos. Dessa forma, os resultados deste trabalho corroboram que a utilização de algoritmos bioinspirados para a otimização do posicionamento de antenas constitui uma alternativa promissora para aprimorar a eficiência e a robustez das redes de telecomunicações, contribuindo para a superação das limitações dos métodos tradicionais e promovendo avanços significativos na área.

**Palavras-chave:** Otimização. Algoritmos bioinspirados. Python. PSO. FA. BBO. NSGA-II. Enlaces de rádio. Geoprocessamento.

## ABSTRACT

This work aims to develop and compare optimization models for the placement of antennas in multiple radio links, considering geographical factors, coverage, interference, and other aspects relevant to the performance of telecommunication networks. For implementation, the region between the cities of Sobral and Massapê was selected to represent, respectively, the transmitting and receiving areas. Geospatial analysis was conducted using geoprocessing techniques implemented in Python to extract the necessary data for evaluating link configurations. The proposed methodology is based on the application and parameterization of bioinspired algorithms—specifically, Particle Swarm Optimization (PSO), Firefly Algorithm (FA), Biogeography-Based Optimization (BBO), and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)—which were compared with a random approach implemented using Matlab *software*, with the aim of highlighting their respective efficiencies. To ensure the robustness of the results, a Monte Carlo (MC) procedure was adopted, allowing for a statistically consistent evaluation of computational costs and solution quality. The results indicate that although the bioinspired algorithms may exhibit higher execution times in certain cases, they yield significantly lower average cost solutions compared to the random technique. Furthermore, a comparative analysis between swarm intelligence-based metaheuristics (PSO and FA) and evolutionary computation-based approaches (BBO and NSGA-II) was conducted. The findings suggest that the choice of approach should be guided by the specific application: while swarm intelligence methods tend to produce more robust solutions despite higher computational costs, evolutionary computation techniques—particularly BBO—offer advantages when parameterization time is a critical constraint, even if the overall performance is relatively modest. Thus, the results of this study confirm that the use of bioinspired algorithms for optimizing antenna placement constitutes a promising alternative for enhancing the efficiency and robustness of telecommunication networks, thereby contributing to overcoming the limitations of traditional methods and fostering significant advancements in the field.

**Keywords:** Optimization. Bioinspired algorithms. Python. PSO. FA. BBO. NSGA-II. Radio links. Geoprocessing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão do espectro magnético com frequência em Hz . . . . .	22
Figura 2 – Comportamento de uma onda eletromagnética . . . . .	24
Figura 3 – Fenômeno de reflexão e refração . . . . .	26
Figura 4 – Diagrama esquemático das zonas de Fresnel . . . . .	30
Figura 5 – Taxa de precipitação excedida em 0,01% de um ano médio em mm/h . . . . .	32
Figura 6 – Fluxograma de um SIG . . . . .	48
Figura 7 – Compartimento de carga do Endeavour em posição de mapeamento. . . . .	49
Figura 8 – Exemplo do perfil de elevação entre o município de Sobral e Massapê para um único caminho . . . . .	53
Figura 9 – Posicionamento das antenas transmissoras . . . . .	54
Figura 10 – Posicionamento das antenas receptoras . . . . .	54
Figura 11 – Página de download do arquivo raster. . . . .	58
Figura 12 – Fluxograma do processo para análise dos obstáculos. . . . .	59
Figura 13 – Demonstração do ponto crítico da ligação T2-R1. . . . .	60
Figura 14 – Processo de importação de dados para o Matlab. . . . .	62
Figura 15 – Número de soluções possíveis em função das antenas transmissoras e receptoras. . . . .	74
Figura 16 – Agentes representativos para as soluções candidatas. . . . .	74
Figura 17 – Ilustração parcial do posicionamento das antenas. . . . .	76
Figura 18 – Fluxograma de execução geral dos algoritmos bioinspirados. . . . .	77
Figura 19 – Varredura para valores de <i>NumPop</i> . . . . .	81
Figura 20 – Varredura para valores de $c_1$ e $c_2$ . . . . .	82
Figura 21 – Varredura para valores de $w$ e $w_{Amor}$ . . . . .	83
Figura 22 – Varredura para valores de <i>PopVag</i> . . . . .	85
Figura 23 – Varredura para valores de $\alpha_0$ e $\alpha_{Amor}$ . . . . .	86
Figura 24 – Varredura para valores de $\gamma$ e $\beta_0$ . . . . .	87
Figura 25 – Varredura para valores de <i>NumHabitat</i> . . . . .	88
Figura 26 – Varredura para valores de <i>TaxaPreservacao</i> . . . . .	89
Figura 27 – Varredura para valores de <i>FatorMut</i> e $\sigma_{Mut}$ . . . . .	90
Figura 28 – Varredura para valores de <i>NumInd</i> . . . . .	92
Figura 29 – Varredura para valores de <i>PerCruz</i> e <i>PerMut</i> . . . . .	93
Figura 30 – Varredura para valores de <i>Mu</i> . . . . .	94

Figura 31 – Execução da abordagem randômica. . . . .	95
Figura 32 – Comparativo do custo médio entre a abordagem randômica e os algoritmos bioinspirados. . . . .	96
Figura 33 – Ilustrativo dos pontos fortes atribuídos a cada meta-heurística. . . . .	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão das faixas de propagação . . . . .	22
Tabela 2 – Relação do fator $k$ com o gradiente de refratividade . . . . .	29
Tabela 3 – Amostra dos dados geográficos das antenas transmissoras. . . . .	56
Tabela 4 – Amostra dos dados geográficos dos obstáculos. . . . .	59
Tabela 5 – Tempo de execução para diferentes valores de MC. . . . .	80
Tabela 6 – Tempo de execução para a parametrização de cada algoritmo. . . . .	94
Tabela 7 – Tempo de execução para cada abordagem. . . . .	97
Tabela 8 – Soluções retornadas para cada abordagem. . . . .	97
Tabela 9 – Coeficientes para o cálculo da atenuação específica. . . . .	128
Tabela 10 – Coeficientes para $ka_H$ . . . . .	128
Tabela 11 – Coeficientes para $ka_V$ . . . . .	128
Tabela 12 – Coeficientes para $\alpha_H$ . . . . .	129
Tabela 13 – Coeficientes para $\alpha_V$ . . . . .	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANN	Redes Neurais Artificiais
ASI	<i>Italian Space Agency</i>
BBO	<i>Biogeography-Based Optimization</i>
CE	Computação Evolucionária
CGIAR-CSI	<i>Consortium for Spatial Information</i>
CHC	<i>Cross-generational elitist selection, Heterogeneous recombination, and Cataclysmic mutation</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
ED	Evolução Diferencial
EHF	<i>Extra High Frequency</i>
FA	<i>Firefly Algorithm</i>
FCC	Comissão Federal de Comunicações
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HSI	<i>Habitat Suitability Index</i>
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IE	Inteligência de Enxame
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITU	International Telecommunication Union
LF	<i>Low Frequency</i>
LGT	Lei Geral das Telecomunicações
MC	Monte Carlo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MF	<i>Medium Frequency</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
PDFF	Plano de Atribuição, Distribuição e Destinação de Radiofrequências
PG	Programação Genética

PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QP	Questões de Pesquisa
RF	Radiofrequência
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SIA	Sistemas Imunológicos Artificiais
SIGs	Sistemas de Informações Geográficas
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SIV	<i>Suitability Index Variables</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
Telebras	Telecomunicações Brasileiras S.A
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	16
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b> . . . . .	16
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b> . . . . .	17
<b>1.3</b>	<b>Estado da Arte</b> . . . . .	18
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b> . . . . .	19
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> . . . . .	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	21
<b>2.1</b>	<b>Comunicação sem fio e o espectro eletromagnético</b> . . . . .	21
<b>2.2</b>	<b>Equações de Maxwell</b> . . . . .	23
<b>2.3</b>	<b>A propagação das ondas eletromagnéticas</b> . . . . .	24
<b>2.3.1</b>	<i>Propagação no espaço livre</i> . . . . .	24
<b>2.3.2</b>	<i>Reflexão e refração</i> . . . . .	25
<b>2.4</b>	<b>Aspectos geográficos e atmosféricos</b> . . . . .	26
<b>2.4.1</b>	<i>O raio de curvatura relativo à Terra</i> . . . . .	27
<b>2.4.2</b>	<i>Fator <math>k</math></i> . . . . .	28
<b>2.4.3</b>	<i>Zona de Fresnel</i> . . . . .	29
<b>2.4.4</b>	<i>Atenuação devido às chuvas</i> . . . . .	31
<b>2.4.4.1</b>	<i>Recomendação ITU-R P.838-3</i> . . . . .	32
<b>2.5</b>	<b>Algoritmos bio-inspirados</b> . . . . .	33
<b>2.5.1</b>	<i>Inteligência de enxames</i> . . . . .	34
<b>2.5.1.1</b>	<i>Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas</i> . . . . .	34
<b>2.5.1.2</b>	<i>Algoritmo dos Vaga-lumes</i> . . . . .	37
<b>2.5.2</b>	<b>Computação Evolucionária</b> . . . . .	39
<b>2.5.2.1</b>	<i>Algoritmos Genéticos</i> . . . . .	40
<b>2.5.2.2</b>	<i>Algoritmo Genético de Ordenação Não-Dominada II</i> . . . . .	43
<b>2.5.2.3</b>	<i>Algoritmo de Otimização Baseada em Biogeografia</i> . . . . .	44
<b>2.6</b>	<b>Geoprocessamento</b> . . . . .	47
<b>2.6.1</b>	<i>Sistemas de Informação Geográficas</i> . . . . .	48
<b>2.6.2</b>	<i>Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM90</i> . . . . .	49
<b>2.6.3</b>	<i>Uso da Linguagem Python no Geoprocessamento</i> . . . . .	50

<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>Definindo a Área Estudada . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>3.2</b>	<b>Posicionamento das Antenas . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>3.3</b>	<b>Coleta dos Dados Geográficos . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Exportação das coordenadas . . . . .</i>	<i>55</i>
<b>3.3.2</b>	<i>Obtenção dos dados de altitude . . . . .</i>	<i>55</i>
<b>3.3.3</b>	<i>Análise topográfica e determinação de obstáculos . . . . .</i>	<i>56</i>
<b>3.3.4</b>	<i>Importação dos dados para o Matlab . . . . .</i>	<i>61</i>
<b>3.4</b>	<b>Avaliação da Rede de Enlaces . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Distância entre os enlaces . . . . .</i>	<i>62</i>
<b>3.4.2</b>	<i>Zona de Fresnel e altura das antenas . . . . .</i>	<i>63</i>
<b>3.4.3</b>	<i>Atenuações na transmissão . . . . .</i>	<i>64</i>
<b>3.4.4</b>	<i>Interferências e Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) . . . . .</i>	<i>65</i>
<b>3.4.5</b>	<i>Escalabilidade . . . . .</i>	<i>67</i>
<b>3.4.6</b>	<i>Área de cobertura . . . . .</i>	<i>68</i>
<b>3.4.7</b>	<i>Estrutura final . . . . .</i>	<i>70</i>
<b>3.5</b>	<b>Parâmetros da rede . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>3.6</b>	<b>Abordagem dos algoritmos bioinspirados . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>Abordagem Randômica . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>Parametrização dos Algoritmos . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>4.2.1</b>	<b>PSO . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>4.2.1.1</b>	<i>População de partículas . . . . .</i>	<i>79</i>
<b>4.2.1.2</b>	<i>Fator cognitivo e fator social . . . . .</i>	<i>81</i>
<b>4.2.1.3</b>	<i>Inércia e amortecimento . . . . .</i>	<i>82</i>
<b>4.2.2</b>	<b>FA . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>4.2.2.1</b>	<i>População de vaga-lumes . . . . .</i>	<i>84</i>
<b>4.2.2.2</b>	<i>Coeficiente de mutação inicial e amortecimento . . . . .</i>	<i>85</i>
<b>4.2.2.3</b>	<i>Coeficiente de absorção de luz e atração . . . . .</i>	<i>86</i>
<b>4.2.3</b>	<b>BBO . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>4.2.3.1</b>	<i>Quantidade de habitats . . . . .</i>	<i>87</i>
<b>4.2.3.2</b>	<i>Taxa de preservação . . . . .</i>	<i>89</i>

4.2.3.3	<i>Probabilidade e intensidade de mutação</i>	90
4.2.4	<b><i>NSGA-II</i></b>	90
4.2.4.1	<i>Número de indivíduos</i>	91
4.2.4.2	<i>Percentual de cruzamento e percentual de mutação</i>	92
4.2.4.3	<i>Taxa de mutação</i>	93
4.2.5	<b><i>Tempo Total de Parametrização</i></b>	93
4.3	<b>Execução da Abordagem Randômica</b>	94
4.4	<b>Análise Comparativa dos Resultados</b>	95
4.4.1	<i>Abordagem randômica versus algoritmo bioinspirado</i>	96
4.4.2	<i>Inteligência de Enxames versus Computação Evolucionária</i>	97
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	99
	<b>REFERÊNCIAS</b>	101
	<b>APÊNDICE A –CÓDIGO PARA EXTRAIR AS COORDENADAS DE UM ARQUIVO KML</b>	105
	<b>APÊNDICE B –CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DE ALTITUDES</b>	107
	<b>APÊNDICE C –CÓDIGO PARA A LOCALIZAÇÃO DE OBSTÁCULOS</b>	111
	<b>APÊNDICE D –CÓDIGO PARA CALCULAR O CUSTO DE QUALI- DADE DA REDE</b>	115
	<b>ANEXO A –COEFICIENTES PARA O CÁLCULO DA ATENUAÇÃO PELA CHUVA</b>	128

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O ato de se comunicar perdura na sociedade moderna desde os primórdios, evoluindo de formas rudimentares, empregadas para distâncias curtas, para os modernos sistemas de telecomunicações que conectam continentes. Historicamente, os primeiros métodos de comunicação entre povos utilizavam recursos visuais e sonoros, enquanto, em períodos posteriores, foram empregadas fontes de energia natural e até mesmo animais para transmitir mensagens por distâncias maiores. Com o avanço tecnológico, o ser humano tem buscado incessantemente alternativas que aprimorem a eficácia e a abrangência de suas interações.

O advento da comunicação sem fio remonta ao século XIX, tendo como marco inicial o trabalho do físico-químico inglês Michael Faraday, em 1831, que, por meio de estudos sobre eletricidade e magnetismo, identificou o fenômeno da indução magnética. Esse princípio fundamental demonstra como uma corrente elétrica variável, ao circular por uma bobina, pode induzir uma corrente similar em outra bobina, mesmo sem conexão direta entre elas. Em 1865, o renomado físico escocês James Clerk Maxwell formalizou, por meio de seus postulados, a teoria da propagação das ondas eletromagnéticas, unificando os fenômenos do magnetismo e da eletricidade em quatro equações que regem o comportamento das ondas (FELICE, 2005).

No contexto brasileiro, a comunicação sem fio teve sua primeira manifestação prática em 1894, com o trabalho pioneiro do padre Roberto Landell de Moura. Nascido em 1862, em Porto Alegre, Landell de Moura desenvolveu o primeiro transmissor sem fio, realizado em 1892, que permitiu a transmissão de mensagens por meio de ondas eletromagnéticas com um alcance de aproximadamente oito quilômetros, estabelecendo comunicação entre pontos estratégicos de São Paulo. Entre 1903 e 1904, ele patenteou, nos Estados Unidos, três invenções notáveis – o transmissor de ondas “hertziano ou landelliano”, o telefone sem fio e o telégrafo sem fio –, enquanto a patente brasileira, registrada em 1900 sob o número 3279, consolidou seu pioneirismo (ALENCAR *et al.*, 2010).

Historicamente, o Estado brasileiro detinha o monopólio das telecomunicações, especialmente no setor de telefonia móvel e fixa. Entretanto, com a abertura ao capital externo e a flexibilização legislativa ocorrida durante o governo do ex-presidente Fernando Henrique Cardoso, especialmente após a promulgação da Lei Geral das Telecomunicações (LGT) nº 9.472, em 1997, o setor passou por uma reorganização institucional significativa. A criação da

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), juntamente com novos planos de outorga, concessão e a implementação de um novo esquema tarifário, resultou na transformação das antigas subsidiárias da Telecomunicações Brasileiras S.A (Telebras) em empresas privadas de telefonia, o que, embora tenha gerado dinamismo e crescimento no mercado, também trouxe desafios técnicos, como o compartilhamento de infraestruturas entre diferentes regiões (SILVA, 2014).

No cenário atual, observa-se um crescimento expressivo das tecnologias que utilizam meios físicos, como cabos metálicos e fibra óptica, para a transmissão de dados. A fibra óptica, por exemplo, destaca-se por sua alta capacidade de transmissão, embora apresente desvantagens, como a fragilidade e a complexidade de instalação, que requer o uso de equipamentos de precisão para a junção e conexão de seus cabos de dimensões reduzidas. Em contraste, os enlaces de rádio oferecem vantagens relacionadas ao tempo reduzido de instalação e à possibilidade de cobertura em áreas remotas ou densamente povoadas, onde a implantação e manutenção da infraestrutura de fibra óptica se mostram inviáveis (JUNIOR, 2022).

Nesse contexto, apesar do crescimento das tecnologias baseadas em fibra óptica, a comunicação via rádio mantém características que asseguram sua relevância e longevidade. A própria ANATEL, através do Plano de Desenvolvimento de Pessoas para 2025 - apresentado na portaria nº 2905 -, apresenta estratégias para o desenvolvimento e a atualização contínua dos conhecimentos técnicos, jurídicos, econômicos e regulatórios relativos aos radio enlaces e à autorização do uso de radiofrequência. Tais iniciativas reforçam a importância e a necessidade de estudos voltados ao aprimoramento constante das telecomunicações via rádio.

## 1.2 Motivação

A crescente demanda por conectividade de alta qualidade impõe desafios significativos à eficiência e à robustez das redes de telecomunicações. Em ambientes caracterizados por um elevado número de dispositivos e pela complexidade das interações, os métodos tradicionais e as soluções de *software* convencionais (como *Rádio Mobile* e *Path Loss*) frequentemente encontram limitações na realização de análises precisas e abrangentes. Nesse contexto, a implantação de múltiplos enlaces de rádio e a definição das posições ótimas das antenas revelam-se tarefas particularmente complexas.

Diante desse cenário, propõe-se o emprego de algoritmos bioinspirados aliados a técnicas avançadas de análise de terreno, com o intuito de desenvolver soluções adaptativas e

inovadoras. Essa abordagem representa uma alternativa promissora para superar as restrições dos métodos convencionais, oferecendo a possibilidade de otimizar a configuração das redes de forma mais eficaz.

Para orientar o desenvolvimento deste trabalho, foram formuladas as seguintes Questões de Pesquisa (QP):

- **QP1.** É viável avaliar, para um cenário com múltiplas antenas, todas as possíveis configurações para a implantação dos enlaces de rádio?
- **QP2.** As técnicas de geoprocessamento, implementadas por meio do *software* Python, apresentam precisão suficiente para uma análise detalhada do terreno estudado?
- **QP3.** Dentre as meta-heurísticas aplicadas neste trabalho, qual delas oferece o melhor desempenho global?
- **QP4.** Existem diferenças significativas entre os métodos baseados em Inteligência de Enxames e os baseados em Computação Evolucionária?
- **QP5.** Qual é a diferença, em termos de qualidade da rede, entre a seleção aleatória das posições das antenas e as soluções obtidas por meio das meta-heurísticas?

### 1.3 Estado da Arte

Esta seção apresenta estudos relevantes da comunidade científica que fundamentam e inspiram a proposta deste trabalho, situando o estado da arte nas áreas de otimização e telecomunicações.

Em Hoffman e Gomez (2003), os autores propuseram uma abordagem para o problema de localização de antenas utilizando um protótipo de Sistema de Informação Geográfica. Essa proposta foi formulada como um Problema de Localização com Máxima Cobertura, empregando duas técnicas de otimização: a heurística de localização-alocação, uma técnica de busca local destinada a otimizar soluções em problemas de agrupamento, e a pesquisa tabu, uma metodologia de otimização combinatória que seleciona, dentre um conjunto de possíveis soluções, aquela que melhor otimiza a função objetivo. Os resultados indicaram que a posição inicial das antenas foi significativamente aprimorada, com o algoritmo baseado em pesquisa tabu demonstrando desempenho superior, tanto em termos de qualidade das soluções quanto de tempo de processamento, em comparação com a heurística de localização-alocação.

Em Siliprande et al. (2008), foi desenvolvido um modelo de Programação Linear Multiobjetivo para a localização de antenas transmissoras em provedores de Internet a rádio no

município de Itaperuna. O estudo teve como objetivo principal minimizar a distância mínima entre cada ponto de demanda e a antena instalada, ao mesmo tempo em que se maximizava a cobertura e se minimizavam os custos de instalação. Nesse contexto, a formulação do Problema de Localização de Máxima Cobertura foi utilizada com êxito, resultando em resultados satisfatórios.

No trabalho de Pinheiro (2019), investigou-se a capacidade de tráfego, a propagação, a cobertura e a interferência em sistemas de radiotransmissão. Diferentemente dos estudos anteriores, essa pesquisa utilizou o *software* de predição *Radio Mobile* para a geração de mapas de cobertura e para a análise dos links de propagação de rádio. Adicionalmente, o *software* de geoprocessamento QGIS foi empregado para o recorte das coordenadas da área estudada, a partir dos dados de cobertura obtidos.

Por fim, em Delmondes e Oliveira (2008), foi realizado um estudo sobre o desempenho de antenas inteligentes em arranjos adaptativos, utilizando matrizes circulares uniformes. Neste trabalho, métodos baseados em algoritmos bioinspirados foram aplicados com o objetivo de identificar a melhor rota — isto é, o caminho ótimo para a transmissão — estabelecendo o canal de comunicação entre o nó de origem e o nó de destino. Embora os resultados tenham sido satisfatórios, o estudo envolveu certas simplificações, como a análise do ambiente em duas dimensões, aspecto que é explorado de forma mais aprofundada nesta monografia.

Essa revisão da literatura evidencia as diferentes abordagens adotadas para otimização na área de telecomunicações e ressalta a relevância dos métodos bioinspirados e das técnicas de geoprocessamento, os quais servem de base para o desenvolvimento deste trabalho.

#### 1.4 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento e na comparação de modelos de otimização para determinar o posicionamento ideal de antenas em múltiplos enlaces de rádio, considerando fatores como condições geográficas, área de cobertura, interferências entre as antenas e outros aspectos pertinentes. Para a implementação do estudo, as cidades de Sobral e Massapê foram selecionadas, configurando-se, respectivamente, como áreas transmissora e receptora. A análise geográfica dessas regiões foi realizada mediante técnicas de geoprocessamento utilizando o *software* Python, a partir das quais foi desenvolvida uma função para a avaliação das combinações de enlaces propostas. Em seguida, foram empregadas as meta-heurísticas *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Firefly Algorithm* (FA), *Biogeography-Based Optimization* (BBO) e *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) para identificar

as melhores soluções conforme o critério de otimização estabelecido.

De forma resumida, os principais objetivos deste trabalho são:

- Propor uma metodologia que possibilite a avaliação de uma rede composta por múltiplos enlaces;
- Comparar as meta-heurísticas empregadas, identificando os aspectos mais relevantes de cada abordagem, tais como parametrização, custo computacional e robustez dos resultados;
- Confrontar os resultados obtidos por meio das técnicas bioinspiradas com os gerados por uma abordagem randômica, de modo a evidenciar a superioridade das meta-heurísticas na obtenção de soluções ótimas.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

Esta monografia está organizada em cinco capítulos, sendo o presente a Introdução, que inclui esta seção. A seguir, apresenta-se um resumo dos capítulos subsequentes:

- **Capítulo 2: Fundamentação Teórica.** Este capítulo aborda os principais conceitos relacionados à radiocomunicação, abrangendo desde o comportamento das ondas eletromagnéticas até os aspectos práticos dos radio enlaces, tais como fatores geográficos, atenuações e tipos de antenas. Além disso, apresenta os fundamentos das meta-heurísticas aplicadas neste estudo, detalhando seu funcionamento e os critérios adotados para sua implementação, bem como um panorama das técnicas de geoprocessamento e a utilização do *software* Python como ferramenta de análise.
- **Capítulo 3: Metodologia.** Neste capítulo, descreve-se detalhadamente o processo prático empregado para a análise do problema, incluindo a seleção da área de estudo, a elaboração da função que avalia as combinações de enlaces, e o procedimento de importação dos dados para o *software* Matlab, além da apresentação dos parâmetros da rede.
- **Capítulo 4: Resultados.** Este capítulo expõe a metodologia utilizada para a definição dos parâmetros dos algoritmos bioinspirados por meio de varredura, apresentando, em seguida, a comparação dos resultados obtidos pelas meta-heurísticas, tanto entre si quanto em relação à abordagem randômica.
- **Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros.** O último capítulo sintetiza as principais conclusões do trabalho, respondendo às questões-problema formuladas na Seção 1.2 e sugerindo direções para futuras pesquisas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se a base teórica que fundamenta o desenvolvimento deste trabalho. Na Seção 2.1, será discorrido sobre os princípios da comunicação sem fio, destacando as características do espectro eletromagnético e os mecanismos de propagação das ondas eletromagnéticas.

A Seção 2.4 aborda os aspectos geográficos e atmosféricos relevantes para o dimensionamento dos enlaces de rádio, abrangendo tanto as questões relativas ao raio de curvatura da Terra quanto a influência dos fenômenos pluviométricos na transmissão dos sinais.

Por fim, as Seções 2.5 e 2.6 tratam dos conceitos associados aos algoritmos bioinspirados — com foco nas heurísticas aplicadas nesta monografia — bem como das técnicas de geoprocessamento empregadas na análise da problemática em questão.

### 2.1 Comunicação sem fio e o espectro eletromagnético

É possível definir que os componentes fundamentais para configurar uma rede sem fio são o transmissor, o canal de comunicação e o receptor. O transmissor tem a função de enviar pacotes de dados pelo canal, enquanto o receptor é responsável por requisitar e receber esses pacotes. Já o canal pode ser classificado como aberto, permitindo acesso irrestrito, ou fechado, onde é necessário um código para estabelecer a conexão. Essa topologia também pode ser definida como *não guiada*, termo atribuído às tecnologias de comunicação que se propagam sem a necessidade de um meio como fio ou uma fibra óptica (COMER, 2016).

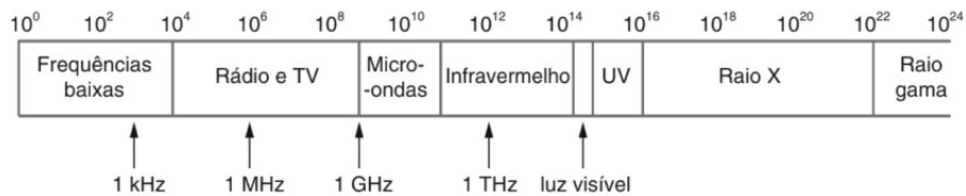
Os mecanismos de comunicação sem fio mais comuns utilizam tecnologias baseadas em redes que empregam ondas eletromagnéticas na faixa de Radiofrequência (RF). A transmissão via RF tem uma vantagem significativa em relação à luz, pois consegue cobrir distâncias maiores e atravessar obstáculos, como paredes de edifícios. As características da energia eletromagnética variam conforme a frequência utilizada. O termo "espectro" é utilizado para descrever o conjunto de frequências disponíveis. No caso dos Estados Unidos, a Comissão Federal de Comunicações (FCC) é responsável por regular a distribuição dessas frequências, estabelecendo normas sobre os limites de potência que os dispositivos de comunicação podem emitir em cada faixa de frequência (COMER, 2016).

Já no Brasil, essa responsabilidade compete à ANATEL. De acordo com o artigo 158 da LGT é responsabilidade da ANATEL criar e atualizar o Plano de Atribuição, Distribuição

e Destinação de Radiofrequências (PDFF), que contempla os diversos serviços e atividades de telecomunicações. Esse plano segue os seguintes princípios fundamentais: assegurar a atribuição de faixas de frequências em conformidade com tratados e acordos internacionais; priorizar o interesse público; promover o desenvolvimento do setor de telecomunicações no Brasil; e facilitar o acesso à informação e o planejamento do espectro de radiofrequências, bem como apoiar a tomada de decisão de interessados, tanto internos quanto externos à Anatel (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2015).

Na Figura 1, é possível observar o espectro eletromagnético geral, assim como a característica de cada uma de suas partes. Além dessa divisão, o espectro também é organizado através de faixas de propagação, sendo elas: *Very Low Frequency* (VLF), *Low Frequency* (LF), *Medium Frequency* (MF), *High Frequency* (HF), *Very High Frequency* (VHF), *Ultra High Frequency* (UHF), *Super High Frequency* (SHF), e *Extra High Frequency* (EHF). Tais nomenclaturas são utilizadas pela International Telecommunication Union (ITU), a qual definiu a frequência atribuída a cada uma dessas faixas. Na tabela 1, é possível analisar essa organização.

Figura 1 – Divisão do espectro magnético com frequência em Hz



Fonte: Adaptado de (COMER, 2016, p. 111).

Tabela 1 – Divisão das faixas de propagação

Denominação	Limite de frequência	Comprimento de onda $\lambda$	Subdivisão métrica
VLF	3 a 30 kHz	100 – 10 km	Ondas Miriamétricas
LF	30 a 300 kHz	10 – 1 km	Ondas Quilométricas
MF	300 a 3000 kHz	1000 – 100 m	Ondas Hectométricas
HF	3 a 30 MHz	100 – 10 m	Ondas Decamétricas
VHF	30 a 300 MHz	10 – 1 m	Ondas Métricas
UHF	300 a 3000 MHz	100 – 10 cm	Ondas Decimétricas
SHF	3 a 30 GHz	10 – 1 cm	Ondas Centimétricas
EHF	30 a 300 GHz	10 – 1 mm	Ondas Milimétricas

Fonte: Adaptado de (MARQUES, 2021)

Neste trabalho, teremos como foco a parte desse espectro que compreende a SHF que, conforme estabelecido pela própria ANATEL, está no intervalo atribuído para a RF.

## 2.2 Equações de Maxwell

Em 1873, Maxwell apresentou seu trabalho que explica o comportamento das ondas eletromagnéticas em escala macroscópica, *A treatise on electricity and magnetism*. Sua pesquisa consolidou os avanços prévios nessa área, incorporando de maneira abrangente as contribuições experimentais de Hertz, bem como as fundamentações teóricas estabelecidas por Gauss, Ampère e Faraday. O impacto dessa descoberta foi tão significativo que é possível afirmar que a história moderna e contemporânea da humanidade pode ser dividida em dois momentos: antes e depois de Maxwell (HEILMANN, 2021).

Maxwell descobriu que a oscilação de uma carga elétrica gera um campo magnético. Ao calcular a velocidade de propagação desse campo, ele encontrou um valor próximo a 300.000.000 m/s, o que coincidiu com a velocidade da luz, já determinada experimentalmente por Fizeau e Foucault. A partir dessa observação, Maxwell concluiu que a luz é, na verdade, uma forma de radiação eletromagnética. Além disso, sugeriu que, como as cargas elétricas podem oscilar em diferentes velocidades, elas poderiam produzir radiações com uma ampla gama de comprimentos de onda, sendo a luz apenas uma manifestação específica desse espectro (OBERZINER, 2008).

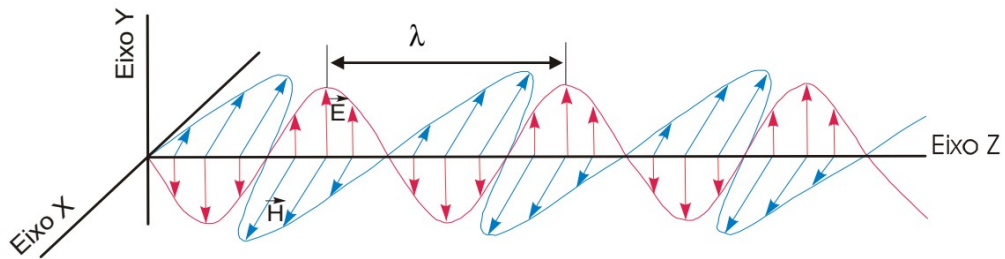
Com base nessas observações, chegaram-se às seguintes conclusões fundamentais:

- Um campo elétrico que varia ao longo do tempo gera um campo magnético;
- De forma análoga, um campo magnético variável no tempo induz a formação de um campo elétrico;
- A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética é determinada pelas propriedades do meio no qual ela se propaga.

A Figura 2 ilustra a propagação de uma onda eletromagnética em um sistema de coordenadas tridimensional. No eixo x, observa-se o campo magnético ( $\vec{H}$ ), enquanto no eixo y está o campo elétrico ( $\vec{E}$ ). O eixo z representa a direção de propagação da onda. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é indicado, caracterizando a distância entre dois pontos consecutivos em fase, como picos ou vales, evidenciando a periodicidade espacial do fenômeno.

Essa disposição reflete a natureza transversal das ondas eletromagnéticas, onde os campos são perpendiculares entre si e à direção de propagação. Esse comportamento é fundamental para caracterizar a natureza desse fenômeno em meios ideais e reais (VIEIRA, 2003). Além disso, um dos parâmetros fundamentais para descrever a propagação de ondas eletromagnéticas é a polarização, que é definida com base na orientação do campo elétrico.

Figura 2 – Comportamento de uma onda eletromagnética



Fonte: Adaptado de (VIEIRA, 2003).

Quando o campo elétrico é perpendicular à superfície da Terra, a polarização é denominada vertical; por outro lado, quando o campo é paralelo à superfície terrestre, a polarização é classificada como horizontal.

### 2.3 A propagação das ondas eletromagnéticas

A propagação de ondas eletromagnéticas no espaço é influenciada pelas características do meio de transmissão, como relevo, vegetação, construções e atmosfera. Para estudar adequadamente esse fenômeno, considera-se inicialmente um modelo ideal no vácuo, onde não há obstáculos nem interferências. Esse cenário ideal, denominado propagação em espaço livre, serve como base para entender os desvios e alterações causados pelas condições reais. As principais interferências surgem de obstáculos físicos e variações atmosféricas, que impactam significativamente o comportamento do sinal. Esse entendimento é fundamental para o planejamento e a análise de sistemas de telecomunicações, especialmente em aplicações como radio enlaces, onde o conhecimento detalhado do meio é essencial para mitigar perdas de sinal e garantir a qualidade das comunicações (MELO, 2009).

#### 2.3.1 Propagação no espaço livre

Embora a propagação em espaço livre seja um caso idealizado, ela desempenha um papel fundamental na compreensão dos fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas. Seu estudo permite o desenvolvimento de modelos matemáticos mais elaborados, que representam melhor os efeitos do ambiente real, como obstáculos e diferentes características do meio. Além disso, as expressões derivadas para o espaço livre servem como base de comparação para validar e avaliar modelos mais complexos aplicados a sistemas diversos.

Nesse contexto, a equação de Friis descreve a relação de perda de propagação entre

uma antena transmissora e uma antena receptora. Tal representação é essencial para calcular a potência recebida em função da potência transmitida, da distância entre as antenas e dos comprimentos de onda envolvidos (PENG, 2024). Na Equação (2.1), é possível analisar essa relação:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (2.1)$$

- $P_r$ : Potência recebida pela antena receptora ( $W$ );
- $P_t$ : Potência transmitida pela antena transmissora ( $W$ );
- $G_t$ : Ganho da antena transmissora (escala linear);
- $G_r$ : Ganho da antena receptora (escala linear);
- $\lambda$ : Comprimento de onda;
- $d$ : Distância entre as antenas ( $m$ ).

A Equação (2.1) pode ser reescrita para calcular a atenuação no percurso através da manipulação logarítmica. Com essa abordagem, a potência recebida pode ser determinada como a soma da potência de transmissão e os ganhos das antenas transmissora e receptora, subtraída pela perda associada à atenuação em espaço livre (MELO, 2009), resultando na Equação (2.2):

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 92,5 - 20 \cdot \log(d) - 20 \cdot \log(f). \quad (2.2)$$

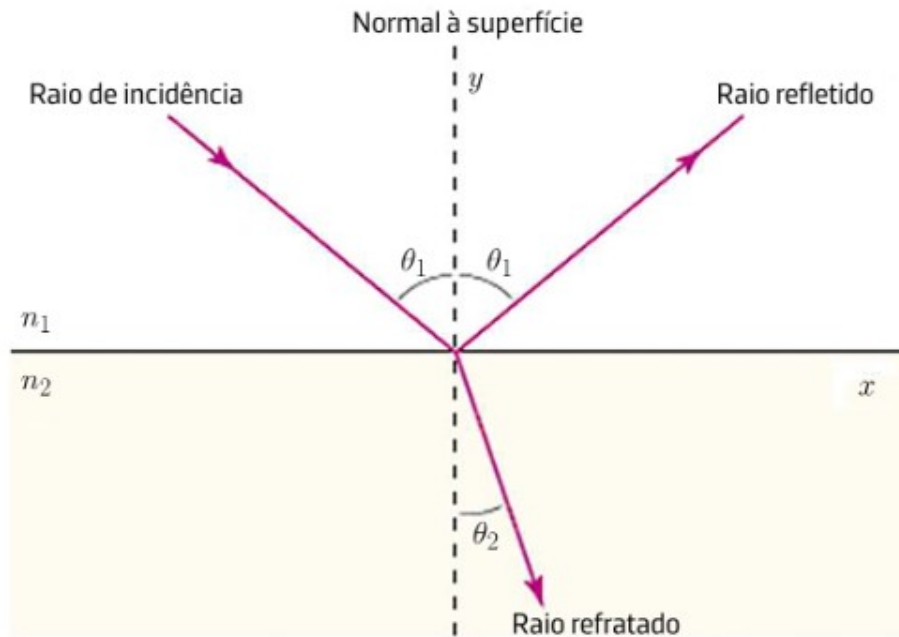
Após a manipulação algébrica, ambas as potências são expressas em  $dBm$ , com a distância  $d$  em quilômetros (km), ganhos em  $dB$  e a frequência  $f$  em giga-hertz (GHz).

### 2.3.2 Reflexão e refração

Os fenômenos de reflexão e refração ocorrem quando uma onda eletromagnética atravessa a interface entre dois meios com diferentes índices de refração, denominados  $n_1$  (meio 1) e  $n_2$  (meio 2). Nesse processo, parte do feixe incidente é refletido, retornando ao meio original, enquanto a outra parte é transmitida e refratada, propagando-se no segundo meio (CESAD, 2022). Na Figura 3 é possível observar esse comportamento:

Ambos os fenômenos são regidos por três leis fundamentais que relacionam o ângulo de incidência  $\theta_i$  (formado entre o raio incidente e a normal à superfície), o ângulo de reflexão  $\theta_r$ , (formado entre o raio refletido e a normal) e o ângulo de refração  $\theta_2$  (formado entre o raio refratado e a normal à superfície). São elas:

Figura 3 – Fenômeno de reflexão e refração



Fonte: Adaptado de (LAGE, 2024).

1. Os raios incidente, refletido e refratado encontram-se no mesmo plano, que é perpendicular à interface entre os dois meios.
2. O ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) é igual ao ângulo de reflexão ( $\theta_1'$ ):

$$\theta_1 = \theta_1'. \quad (2.3)$$

3. A relação entre o ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) e o ângulo de refração ( $\theta_2$ ) é determinada pelos índices de refração dos meios ( $n_1$  e  $n_2$ ).

#### 2.4 Aspectos geográficos e atmosféricos

Nesta seção, serão analisados os aspectos geográficos fundamentais para o planejamento de um rádio enlace, bem como as perdas associadas a esses fatores. Esta análise abordará, inicialmente, as características relacionadas ao raio de curvatura da Terra e suas implicações na propagação do sinal. Em seguida, serão discutidos os efeitos das reflexões e refrações que ocorrem ao longo do trajeto de transmissão, sejam elas provocadas por obstáculos físicos, como edificações, relevo e vegetação, ou por fenômenos atmosféricos, como variações da refatividade do ar e condições meteorológicas.

### 2.4.1 O raio de curvatura relativo à Terra

Segundo Ferreira (2001), a primeira tentativa de calcular o raio de curvatura da Terra foi realizada pelo cientista britânico Alfred Russel Wallace (1823-1913) em meados do século XIX. Por meio de um experimento utilizando um canal de navegação como referência, Wallace buscou refutar as ideias defendidas por adeptos de uma seita que acreditava na Terra plana. Os resultados obtidos por Wallace mostraram-se notavelmente próximos dos valores determinados com maior precisão em décadas subsequentes.

No cenário deste trabalho, o raio de curvatura será analisado utilizando uma abordagem mais contemporânea. Conforme proposto em Manning (2009), as ondas de rádio não se propagam em trajetórias retilíneas devido ao fenômeno de refração do sinal. A curvatura do trajeto da onda é influenciada pelo gradiente local de refatividade experimentado em cada ponto ao longo do caminho de transmissão, definido por:

$$G = \frac{dN}{dh}, \quad (2.4)$$

onde:

$$N(h) = N_0 \exp - \frac{h}{h_0}, \quad (2.5)$$

- $G$ : Gradiente de refatividade;
- $N$ : Índice de refração do ar atmosférico;
- $N_0$ : Refratividade média para o nível do mar (fixado em 315 unidades);
- $h$ : Altura em relação ao solo, dada em quilômetros (km);
- $h_0$ : Taxa de decaimento exponencial do índice de refração (fixado em 7,35 km para a atmosfera média).

A análise das Equações (2.4) e (2.5) permite concluir que a refatividade atmosférica  $N$  apresenta uma diminuição exponencial com o aumento da altitude. Esse fenômeno pode ser explicado pelas variações nas propriedades atmosféricas, como pressão e temperatura, que ocorrem em função da altitude. Tais alterações afetam diretamente o índice de refração do ar, resultando na redução de  $N$  com a elevação. Esse comportamento é consistente com as características físicas da atmosfera, onde a densidade do ar e outros parâmetros críticos diminuem de forma exponencial com a altura (MANNING, 2009).

Ao calcular a média desses gradientes pontuais ao longo de toda a trajetória, pode-se assumir que a onda eletromagnética segue uma trajetória curva. Nesse contexto, o percurso do

raio pode ser modelado como um arco com raio  $r$ . Esse raio é inversamente proporcional ao gradiente médio do índice de refração ao longo do trajeto, permitindo a formulação da seguinte aproximação:

$$\frac{1}{r} = \frac{dN}{dh}. \quad (2.6)$$

Além disso, também é necessário considerar que a superfície terrestre sobre a qual a onda se propaga não é perfeitamente plana. Mesmo em cenários que envolvem superfícies aparentemente planas, como o nível do mar, a curvatura da Terra deve ser levada em conta. A Terra, por sua vez, não possui um formato perfeitamente esférico, sendo mais precisamente descrita como um esferoide oblato <sup>1</sup>. Contudo, para fins de simplificação e viabilização dos cálculos, a superfície terrestre pode ser aproximada como um arco com um raio médio de 6.371 km, parâmetro que será adotado para os cálculos deste trabalho.

#### 2.4.2 Fator $k$

Conforme exposto na Seção 2.4.1, as ondas eletromagnéticas viajariam em linhas retas se a atmosfera fosse homogênea. Nesse contexto, outro parâmetro relevante a ser considerado no planejamento de um enlace de rádio é o fator  $k$  <sup>2</sup>, o qual é definido como um parâmetro de correção do raio efetivo da Terra. Esse fator depende do gradiente de refatividade da atmosfera em questão, ou seja, está diretamente relacionado às condições atmosféricas do local. Considerando que o raio efetivo da Terra é aproximadamente 6.371 km, o valor de  $k$  pode ser estimado conforme a Equação (2.7):

$$k \approx \frac{1}{1 + \frac{dN/dh}{157}}. \quad (2.7)$$

Nas proximidades da superfície terrestre, o gradiente do índice de refatividade - Equação (2.4) - é aproximadamente -39 N-unidades/km, o que resulta em um fator de raio efetivo da Terra  $k = 4/3$ . Este fenômeno é conhecido como refração normal ou atmosfera padrão, onde os sinais de rádio seguem uma trajetória reta ao longo da superfície terrestre, propagando-se livremente para o espaço sem obstruções.

<sup>1</sup> Figura geométrica tridimensional cujo eixo equatorial é maior que o eixo polar.

<sup>2</sup> Esse fator é comumente referido como *fator - k* e não deve ser confundido com o fator geomagnético "K".

Quando o valor de  $k$  é superior a  $4/3$ , ocorre o fenômeno de sub-refração, no qual as ondas de rádio se propagam de forma anômala, afastando-se da superfície terrestre. Por outro lado, quando o fator  $k$  se situa no intervalo entre 1 e  $4/3$ , ocorre a super-refração, caracterizada pela propagação das ondas de rádio em direção à superfície da Terra. Este comportamento resulta no aumento do alcance do horizonte de rádio além da linha de visão, devido às múltiplas reflexões ocorridas nas camadas mais baixas da atmosfera.

Em condições em que  $k$  é inferior a 1, verifica-se o fenômeno de *ducting*, no qual as ondas de rádio se curvam para baixo com uma curvatura superior à da própria Terra. Neste cenário, a energia de rádio pode ficar aprisionada entre uma camada da troposfera e a superfície da Terra ou do mar (ducto de superfície), ou entre duas camadas dentro da troposfera (ducto elevado). Esse tipo de propagação, assemelhada a uma guia de ondas, pode resultar em sinais de alta intensidade sendo transmitidos a distâncias muito superiores à linha de visão, possibilitando comunicação a longas distâncias (ADEDIJI *et al.*, 2011). Na tabela 2, é possível observar as principais relações entre o fator  $k$  e o gradiente de refratividade.

Tabela 2 – Relação do fator  $k$  com o gradiente de refratividade

fator- $k$	Gradiente de refratividade ( $G$ )
$k = 1$	$G = 0$
$k = 4/3$	$G = -39$
$k = \infty$	$G = -157$
$k < 1$	$G > 0$

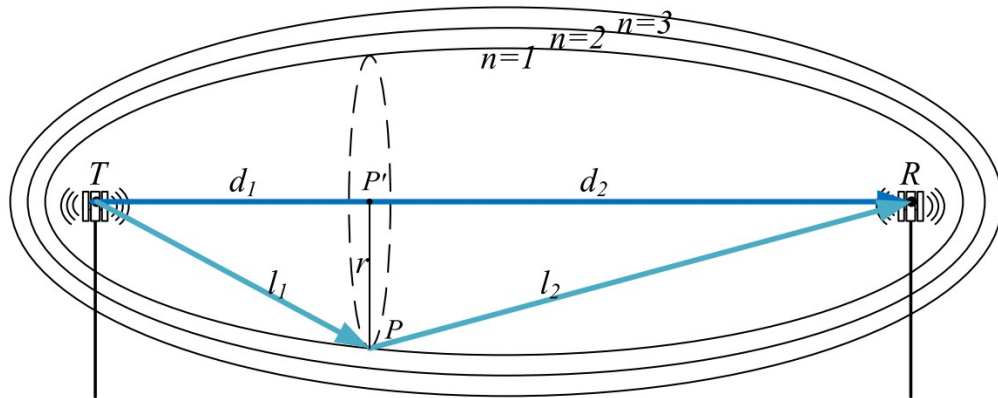
Fonte: Adaptado de (MANNING, 2009)

### 2.4.3 Zona de Fresnel

Considerando um cenário ideal, durante o fenômeno de propagação das ondas eletromagnéticas o sinal transmitido segue uma trajetória linear do transmissor ao receptor. No entanto, esse sinal pode percorrer diferentes caminhos antes de alcançar o receptor, particularmente em situações onde há obstruções ou objetos defletores entre os dois pontos. Essas variações no percurso implicam diferenças no comprimento dos trajetos, podendo fazer com que o sinal chegue ao receptor fora de fase em relação ao sinal transmitido. Essa defasagem pode resultar em interferências construtivas ou destrutivas (XING *et al.*, 2024). A análise desse fenômeno pode ser adequadamente representada pelas zonas de Fresnel, conforme ilustrado na Figura 4.

Na Figura 4, as zonas de Fresnel são descritas como regiões elipsoidais alongadas

Figura 4 – Diagrama esquemático das zonas de Fresnel



Fonte: Adaptado de (XING *et al.*, 2024).

que englobam o transmissor e o receptor. Nessas zonas, a diferença entre as distâncias de transmissão pelo caminho indireto (composto pelos segmentos  $l_1$  e  $l_2$ ) e pelo caminho direto (composto pelos segmentos  $d_1$  e  $d_2$ ) corresponde a um múltiplo inteiro de meia onda. Essa relação pode ser expressa pela Equação (2.8):

$$l_1 + l_2 = d_1 + d_2 + n \frac{\lambda}{2}, \quad (2.8)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, e  $n$  é um número inteiro que indica o número da zona de Fresnel. Já  $d_1$  e  $d_2$  representam, respectivamente, a distância do transmissor e receptor até o obstáculo  $P$  (XING *et al.*, 2024).

No planejamento de rádio enlaces, a primeira zona de Fresnel desempenha um papel fundamental. A propagação pode ser considerada em espaço livre quando uma porcentagem significativa dessa zona está livre de obstáculos. Isso ocorre porque dentro do primeiro elipsoide de Fresnel as ondas eletromagnéticas interferem de forma construtiva, fortalecendo a potência do sinal.

Qualquer obstrução nessa área reduz a eficácia da propagação, enfraquecendo a radiação transmitida, conforme ilustrado na Figura 4. Para assegurar a eficiência na propagação, é fundamental que o espaço ao redor da linha de visada tenha uma área livre adequada. Já as radiações originadas nos anéis sucessivos de Fresnel tendem a se cancelar mutuamente, reforçando a importância da contribuição do círculo central, cuja radiação é predominante e, portanto, não deve ser bloqueada (FELICE, 2005).

Para determinar o raio  $r$  da primeira zona de Fresnel, a Equação (2.9) é utilizada:

$$r = 550 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot D}}, \quad (2.9)$$

onde  $D$  é a distância total entre o transmissor e receptor dada em km e  $f$  a frequência do enlace em MHz. A correlação entre o conceito do fator  $k$ , apresentado na Seção 2.4.2, e o da zona de Fresnel estabelece critérios fundamentais para o dimensionamento de rádio enlaces. Nesse contexto, define-se que, para um fator  $k = 4/3$ , a primeira zona de Fresnel deve estar completamente desobstruída (100%). Por outro lado, para um fator  $k = 2/3$ , é aceitável que ao menos 60% da zona de Fresnel esteja livre de obstruções. Esses critérios são aplicáveis, especialmente, a sistemas operando em frequências superiores a 3 GHz (PIAUI, 2013).

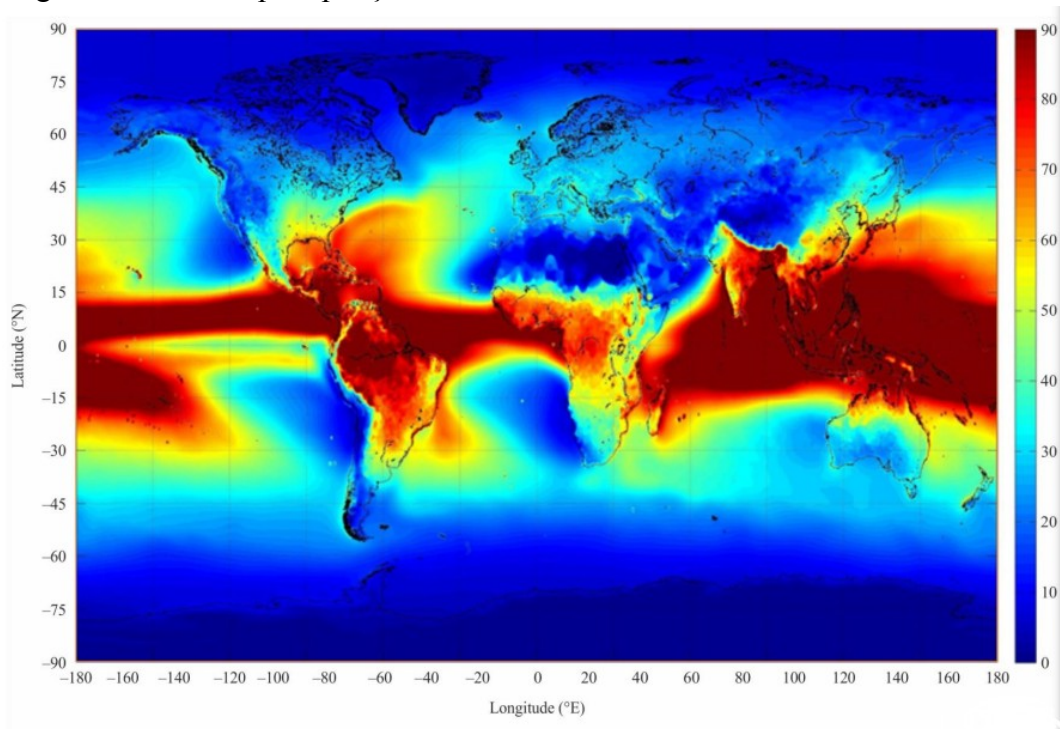
#### 2.4.4 Atenuação devido às chuvas

As chuvas intensas são uma das principais causas de interferências em sistemas de rádio enlace, o que torna essencial o planejamento adequado desses sistemas, visando otimizar os parâmetros do projeto e alcançar a disponibilidade mínima recomendada pelas normas. Diversos estudos abordaram a correlação entre a taxa de precipitação e a atenuação específica em diferentes intensidades de chuva, resultando no desenvolvimento de vários modelos de previsão que são aplicáveis a regiões específicas, os quais estão amplamente documentados na literatura (M.N. *et al.*, 2024).

Também é importante ressaltar que a distribuição da chuva ao longo do enlace geralmente não é homogênea. Em casos onde há áreas com altas taxas de precipitação, essas regiões são denominadas células de chuva. Diversos modelos têm sido propostos para descrever o formato das células de chuva e a distribuição das taxas pluviométricas em diferentes regiões do planeta, os quais abordam aspectos como tamanho, formato e a orientação das gotas de chuva (FELICE, 2005).

Com base na Recomendação ITU-R P.837-7, que analisa as características de precipitação em diferentes regiões do globo terrestre, é possível observar a significativa variação desse parâmetro ao redor do mundo. A Figura 5 apresenta a taxa de precipitação que excede 0,01% em um ano médio nos mais variados locais da Terra, destacando as diferenças regionais no comportamento das chuvas.

Figura 5 – Taxa de precipitação excedida em 0,01% de um ano médio em mm/h



Fonte: Adaptado da Recomendação ITU-R P.837-7.

#### 2.4.4.1 Recomendação ITU-R P.838-3

A atenuação de uma onda que se propaga em um meio com presença de chuva é determinada pela soma das contribuições individuais de cada gota que compõe o meio. Devido às dimensões variadas das gotas de chuva, a atenuação específica  $\mu_R$  (em dB/km) é calculada por meio da integração das contribuições de cada gota, conforme demonstra a Equação (2.10) (FAGUNDES, 2014).

$$\mu_R = 0,4343 \int_0^{\infty} Q_t(D) \cdot N(D) dD, \quad (2.10)$$

onde:

- $Q_t(D)$ : Seção reta de uma gota esférica ( $cm^2$ ) em função do diâmetro  $D$  ( $mm$ );
- $N(D)$ : Número de gotas de chuva por unidade de volume ( $mm^{-1}m^{-3}$ ).

A atenuação específica e a taxa de precipitação  $R$  (mm/h) também podem ser correlacionadas de forma prática pela Equação (2.11):

$$\mu_R = ka \cdot R^\alpha. \quad (2.11)$$

De acordo com os critérios estabelecidos na Recomendação ITU-R P.838-3, os coeficientes  $ka$  e  $\alpha$  são fornecidos em função da frequência da onda, expressa em GHz<sup>3</sup>, e de sua polarização. Tais coeficientes resultam de ajustes empíricos baseados em curvas de regressão e leis de potência, derivadas de cálculos de espalhamento eletromagnético.

Para determinar a atenuação específica associada a uma determinada taxa de precipitação, a frequência de operação ( $f$ ) é utilizada como parâmetro para selecionar os coeficientes de regressão apropriados. Os valores de  $ka$  e  $\alpha$  são obtidos por meio das Equações (2.12) e (2.13) para as polarizações horizontal (H) e vertical (V), resultando nos coeficientes  $ka_H$ ,  $ka_V$ ,  $\alpha_H$  e  $\alpha_V$ . Já os valores de (FAGUNDES, 2014).

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right]^2 + m_k \log_{10} f + c_k. \quad (2.12)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right]^2 + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha. \quad (2.13)$$

No Anexo A estão descritos os valores dos coeficientes atribuídos a cada faixa de frequência, que variam de acordo com o tipo de polarização. Também podem ser consultados os valores de  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $m_k$ ,  $c_k$ ,  $m_\alpha$  e  $c_\alpha$ , que são definidos pela ITU-R P.838-3.

## 2.5 Algoritmos bio-inspirados

Os algoritmos bio-inspirados têm se consolidado como métodos eficientes para a resolução de problemas de otimização complexos, particularmente aqueles de natureza não estacionária e multidimensional. Inspirando-se em processos naturais, essa classe de algoritmos abrange diversas abordagens baseadas em fenômenos biológicos. De acordo com a literatura especializada, esses algoritmos podem ser classificados em quatro principais categorias: Inteligência de Enxame (IE), Computação Evolucionária (CE), Redes Neurais Artificiais (ANN) e Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) (MENEZES *et al.*, 2016).

Neste trabalho, serão aplicados algoritmos pertencentes a duas dessas classes: IE e CE. Ambas as abordagens têm sido amplamente exploradas na literatura e já foram aplicadas em diversos contextos, incluindo a área de radiocomunicação, conforme demonstrado por Delmondes e Oliveira (2008). A descrição detalhada desses modelos será apresentada nas seções 2.5.1 e 2.5.2.

<sup>3</sup> O intervalo adotado é entre 1 e 1000 GHz.

### 2.5.1 *Inteligência de enxames*

A IE é uma abordagem que investiga o comportamento coletivo de indivíduos em sistemas auto-organizados e descentralizados. Este conceito, amplamente aplicado em áreas de Inteligência Artificial (IA), ganhou relevância nos últimos anos devido à sua capacidade de modelar comportamentos complexos a partir de interações simples entre agentes (MARTINS, 2017).

A base da IE é inspirada nos comportamentos de enxames sociais presentes na natureza, como formigas, abelhas, cupins, vermes, bandos de pássaros e cardumes de peixes. Apesar de serem formados por indivíduos com capacidades cognitivas limitadas, esses enxames demonstram um comportamento coordenado que permite alcançar objetivos específicos, como busca de alimento ou proteção coletiva. Essa organização espontânea resulta em um sistema auto-organizado, no qual a interação entre os agentes segue regras simples, mas eficazes. Por exemplo, cupins e minhocas podem construir estruturas sofisticadas, como ninhos e túneis, enquanto formigas e abelhas utilizam a IE para encontrar fontes de alimento de forma eficiente. No caso das formigas, a interação ocorre por meio da liberação de feromônios, facilitando a identificação do caminho mais curto até o alimento. Em colônias de abelhas, o processo é ainda mais complexo, envolvendo a comunicação realizada na "área de dança" da colmeia, onde as abelhas exploradoras compartilham informações sobre novas fontes de alimento (MARTINS, 2017).

Nos últimos anos, métodos baseados na IE têm sido amplamente utilizados na resolução de problemas complexos de otimização. Dentre esses métodos, destacam-se o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) e o Algoritmo dos Vaga-lumes (*Firefly Algorithm* – FA).

#### 2.5.1.1 *Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas*

O PSO, proposto inicialmente em Eberhart e Kennedy (1995), tem suas origens fundamentadas em duas abordagens principais. A primeira e mais evidente está relacionada à vida artificial, com destaque para o comportamento coletivo observado em bandos de pássaros, cardumes de peixes e enxames. A segunda, por sua vez, conecta o PSO à computação evolucionária, estabelecendo paralelos tanto com algoritmos genéticos quanto com estratégias evolutivas.

O conceito central do PSO é de natureza bastante simples, permitindo que seja implementado com poucas linhas de código. Além disso, o método utiliza operadores matemáticos básicos e apresenta alta eficiência computacional, tanto em termos de requisitos de memória quanto de velocidade de processamento. Essas características contribuem para a ampla aplicabilidade da PSO em diversos problemas de otimização.

Embora compartilhe semelhanças com os algoritmos genéticos, especialmente pelo fato de ambos iniciarem com uma população de soluções aleatórias, o PSO se diferencia por introduzir o conceito de velocidade. Cada solução potencial, denominada partícula, recebe uma velocidade inicial aleatória e é movimentada pelo espaço de busca, o que representa uma navegação contínua pelo hiperespaço de soluções.

Durante o processo de otimização, cada partícula armazena as coordenadas associadas à melhor solução individual encontrada até aquele momento, denominadas de *pbest* (*personal best*). Paralelamente, o PSO também mantém um registro da melhor solução global alcançada por qualquer partícula da população, conhecido como *gbest* (*global best*). Esse mecanismo de memória coletiva e individual permite que as partículas ajustem suas trajetórias com base nas informações locais e globais, maximizando a eficiência na busca pela solução ótima (EBERHART; KENNEDY, 1995).

O movimento de uma partícula  $i$ , pertencente a um enxame composto por  $N$  indivíduos, é descrito por três vetores em um espaço de busca  $D$ -dimensional. Esses vetores são: a posição atual da partícula no espaço de busca, representada como  $\mathbf{z}_i^{(t)} = [z_{i1}^{(t)}, z_{i2}^{(t)}, \dots, z_{iD}^{(t)}]$ ; a melhor posição encontrada individualmente pela partícula até o momento, denotada por  $\mathbf{p}_i^*(t) = [p_{i1}^*(t), p_{i2}^*(t), \dots, p_{iD}^*(t)]$ ; e sua velocidade, expressa como  $\mathbf{v}_i^{(t)} = [v_{i1}^{(t)}, v_{i2}^{(t)}, \dots, v_{iD}^{(t)}]$ .

A inicialização das posições e velocidades de todas as partículas é realizada de maneira aleatória dentro dos limites definidos pelo espaço de busca. Esse procedimento assegura uma exploração inicial diversificada do espaço de soluções, favorecendo o desempenho do algoritmo.

A cada iteração  $t$ , a atualização das posições de todas as partículas do enxame ocorre de acordo com as Equações (2.14) e (2.15):

$$v_{ij}^{(t+1)} = v_{ij}^{(t)} + c_1 r_1 (p_{ij}^* - z_{ij}^{(t)}) + c_2 r_2 (p_{\text{best},j}^* - z_{ij}^{(t)}), \quad (2.14)$$

$$z_{ij}^{(t+1)} = z_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)}, \quad (2.15)$$

onde  $c_1$  e  $c_2$  são constantes de ponderação conhecidas como fatores cognitivo e social, respectivamente, frequentemente ajustadas em torno de 2. Os termos  $r_1$  e  $r_2$  representam números aleatórios independentes, gerados a cada iteração no intervalo  $[0, 1]$ . O índice  $j$  refere-se à  $j$ -ésima dimensão do espaço de busca  $D$ , enquanto  $p_{ij}^*$  é a melhor posição individual alcançada pela partícula  $i$ , e  $p_{\text{best},j}^*$  é a melhor posição global descoberta até aquele momento pelo enxame (MARTINS, 2017).

Após a atualização das posições, cada partícula redefine sua melhor posição individual,  $p_i^*$ , com base na avaliação da função objetivo  $F$ , como descrito na Equação (2.16):

$$\mathbf{p}_i^{*(t+1)} = \begin{cases} \mathbf{p}_i^{*(t)}, & \text{se } F(\mathbf{p}_i^{*(t)}) \leq F(\mathbf{z}_i^{(t+1)}), \\ \mathbf{z}_i^{(t+1)}, & \text{se } F(\mathbf{p}_i^{*(t)}) > F(\mathbf{z}_i^{(t+1)}), \end{cases} \quad (2.16)$$

em que se assume um problema de minimização, ou seja, soluções com menores valores de  $F$  são preferíveis. No Algoritmo 1 é descrito o pseudocódigo que rege a lógica básica desse modelo de otimização.

---

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo do algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*)
 

---

**Input:** Função objetivo  $F(\mathbf{z})$ ,  $\mathbf{z} = [z_1 \dots z_D]^T$

**Output:** Solução ótima  $z^*$

Gere o enxame inicial  $\mathbf{z}_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ );

Avalie o enxame com  $F(\mathbf{z})$ ;

$it = 1$ ;

**while**  $it \leq it_{max}$  **do**

**for**  $i = 1$  até  $N$  partículas **do**

        Atualize  $\mathbf{v}_i$  utilizando a Equação (2.14);

        Atualize  $\mathbf{z}_i$  utilizando a Equação (2.15);

**if**  $F(\mathbf{p}_i) < F(\mathbf{z}_i)$  **then**

$\mathbf{p}_i^* = \mathbf{z}_i$ ;

**end**

**end**

    Atualize  $\mathbf{p}_{best}$ ;

$it = it + 1$ ;

**end**

    Processe os resultados e realize a visualização;

---

É importante ressaltar que a velocidade das partículas é limitada por um valor máximo, representado por  $v_{max}$ . Essa limitação é introduzida para evitar que o sistema entre em um estado conhecido como "explosão", caracterizado por um crescimento descontrolado das velocidades e, conseqüentemente, das posições das partículas, tendendo ao infinito. Sem essa restrição, o comportamento das partículas poderia comprometer a convergência e a estabilidade do algoritmo. A inclusão de  $v_{max}$  assegura que a magnitude das velocidades permaneça controlada, garantindo que o sistema evolua de maneira ordenada (MARTINS, 2017).

### 2.5.1.2 Algoritmo dos Vaga-lumes

Proposto inicialmente em Yang (2008), o Algoritmo dos Vaga-lumes (*Firefly Algorithm* - FA) baseia-se no comportamento bioluminescente de insetos da família *Lampyridae*, os quais emitem *flashes* de luz para fins de reprodução, defesa contra predadores e comunicação intra-espécie. Esses padrões luminosos, regulados por processos bioquímicos, desempenham

papel crucial nos rituais de acasalamento, sendo as fêmeas atraídas por machos que emitem *flashes* mais intensos e rítmicos.

No contexto do FA, a intensidade do brilho é modelada como função objetivo, influenciando a movimentação dos vaga-lumes em direção àqueles com maior luminosidade, representando soluções mais promissoras. Além disso, as decisões coletivas baseadas na intensidade luminosa ilustram o potencial adaptativo do algoritmo, permitindo sua aplicação eficiente em problemas de otimização complexos. Esses aspectos tornam o FA uma ferramenta relevante, com fundamentos inspirados na seleção natural e na interação social dos vaga-lumes.

Para uma melhor compreensão da sua execução, o FA pode ser descrito em três etapas principais, sendo a primeira: o brilho. Ele é determinado com base na distância entre dois vaga-lumes e no coeficiente de absorção atmosférica. Cada vaga-lume é associado a uma intensidade luminosa calculada pela Equação (2.17):

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2}, \quad (2.17)$$

onde  $I$  é a intensidade da fonte de luz,  $\gamma$  é o coeficiente de absorção,  $r$  é a distância entre os dois vaga-lumes considerados, e  $I_0$  representa a intensidade da fonte de luz quando  $r = 0$ .

Segundo, tem-se a atratividade entre os vaga-lumes que pode ser expressa pela Equação (2.18):

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2}, \quad (2.18)$$

onde  $\beta_0$  é a atratividade inicial do vaga-lume quando  $r = 0$ .

Por fim, tem-se a análise do movimento. Para toda a população e para cada par de vaga-lumes, aquele com menor intensidade de brilho move-se em direção ao mais brilhante. O modelo de movimentação é definido pela Equação (2.19):

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \times \text{randn}(-0.5, 0.5), \quad (2.19)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de mutação, geralmente adaptável ao longo das iterações,  $\text{randn}(-0.5, 0.5)$  é um número aleatório normalizado entre  $-0.5$  e  $0.5$ . A função  $\text{randn}$  é, por padrão, empregada para gerar números aleatórios seguindo a distribuição normal padrão, isto é,  $N(0, 1)$ . Na equação 2.19, esses valores são, contudo, normalizados para o intervalo  $[-0.5, 0.5]$ , de modo a

restringir a amplitude da perturbação. Assim, o termo  $\alpha \times \text{randn}(-0.5, 0.5)$  incorpora uma mutação controlada, na qual  $\alpha$  atua como coeficiente modulador, permitindo um balanço adequado entre a exploração e a exploração do espaço de busca (TIGHZERT *et al.*, 2017).

No Algoritmo 2 é descrito o pseudocódigo que define a lógica para a implementação do FA.

---

**Algoritmo 2:** Pseudocódigo do algoritmo FA (*Firefly Algorithm*)

---

**Input:** Função objetivo  $f(\mathbf{x})$ , parâmetros  $\gamma, I_0, \beta_0$ , número de vaga-lumes  $n$

**Output:** Melhor solução global  $\mathbf{g}^*$

Gere uma população inicial de vaga-lumes  $\mathbf{x}_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ );

Defina os parâmetros  $\gamma, I_0, \beta_0$ ;

Avalie a intensidade de luz  $I$  para cada vaga-lume;

**while** o critério de parada não é satisfeito **do**

**for**  $i = 1$  até  $n$  vaga-lumes **do**

**for**  $j = 1$  até  $n$  vaga-lumes **do**

**if**  $f(\mathbf{x}_i) > f(\mathbf{x}_j)$  **then**

                Mova o vaga-lume  $\mathbf{x}_j$  em direção ao vaga-lume  $\mathbf{x}_i$  conforme a Equação (2.19);

**end**

**end**

        Atualize a atratividade  $\beta$  usando a Equação (2.18);

        Avalie as novas soluções e atualize a intensidade de luz  $I$ ;

**end**

    Classifique os vaga-lumes e identifique o melhor global atual  $\mathbf{g}^*$ ;

**end**

    Processe os resultados e realize a visualização;

---

### 2.5.2 Computação Evolucionária

A Computação Evolucionária (CE) é um paradigma pertencente à Computação Natural que se inspira na teoria da evolução de Charles Darwin para simular processos evolutivos. Segundo a teoria darwiniana, o mecanismo de seleção natural promove a sobrevivência dos indivíduos mais adaptados ao ambiente. No âmbito computacional, cada indivíduo corresponde

a uma solução candidata dentro do espaço de busca de um problema específico.

Este campo é composto por diversos subprocessos baseados na dinâmica evolutiva das espécies, incluindo seleção, reprodução, recombinação (ou *crossover*) e mutação. Exemplos representativos de algoritmos evolutivos incluem os Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm - GA*), o Algoritmo CHC (*Cross-generational elitist selection, Heterogeneous recombination, and Cataclysmic mutation*) a Evolução Diferencial (ED) e a Programação Genética (PG), que têm sido amplamente aplicados em diferentes estudos e revisões científicas (MENEZES *et al.*, 2016).

Esses modelos encontram ampla aplicação em diversas áreas do conhecimento, incluindo otimização de soluções, aprendizado de máquina, desenvolvimento de estratégias matemáticas, análise econômica e resolução de problemas de engenharia. Na Biologia, destacam-se por sua utilização em simulações de sistemas imunológicos, modelagem de ecossistemas e descoberta de propriedades de moléculas orgânicas, ilustrando sua versatilidade e relevância em distintos campos científicos.

Na Seção 2.5.2.1, será realizada uma análise detalhada dos algoritmos genéticos, abordando seus fundamentos e características. Em seguida, na Seção 2.5.2.2, também é descrito uma variação dos algoritmos genéticos que apresenta critérios adicionais. Já na Seção 2.5.2.3, será explorado o algoritmo pertencente à CE baseado nos princípios da biogeografia.

#### 2.5.2.1 Algoritmos Genéticos

O termo "algoritmo genético" foi introduzido pela primeira vez por (HOLLAND, 1975) em sua obra *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Este trabalho representou um marco no estabelecimento de um campo de pesquisa que, ao longo dos anos, expandiu-se significativamente, abrangendo aplicações muito além dos algoritmos genéticos originais. A influência de Holland nesse desenvolvimento é amplamente reconhecida, mas é importante destacar que outros cientistas também contribuíram com ideias semelhantes anteriormente.

Na década de 1960, na Alemanha, Ingo Rechenberg e Hans-Paul Schwefel propuseram o conceito de *Evolution Strategie* (estratégia evolutiva), enquanto, nos Estados Unidos, Lawrence Fogel e seus colaboradores desenvolveram a programação evolucionária. Ambos os trabalhos baseavam-se nos princípios da teoria neodarwinista, especificamente nos conceitos de mutação e seleção. Nesse período, a pesquisa em computação evolutiva enfrentava desafios significativos, principalmente devido às limitações tecnológicas da época. Os altos custos computacionais associados a essas técnicas restringiam sua aplicabilidade, considerando o poder de

processamento dos computadores disponíveis nos anos 1960. Apesar disso, os avanços iniciais lançaram as bases para essa área, como documentado na obra *Evolutionary Computing: the Fossil Record*, de David Fogel, que oferece uma visão abrangente sobre esses desenvolvimentos históricos.

A inspiração para a computação evolutiva tem raízes na teoria da evolução, proposta por Charles Darwin em *A Origem das Espécies* (1859). Darwin apresentou o conceito de seleção natural como o mecanismo pelo qual variações hereditárias, ao serem cumulativamente selecionadas ao longo do tempo, poderiam aumentar a aptidão de organismos — entendida como a capacidade de sobrevivência e reprodução. No entanto, Darwin desconhecia as bases genéticas dessas variações. Décadas mais tarde, os experimentos de Gregor Mendel esclareceram os princípios da hereditariedade, e, no início do século XX, a descoberta das mutações genéticas contribuiu para a formulação da síntese moderna da evolução, também conhecida como neodarwinismo.

O modelo neodarwinista incorporou debates sobre a importância relativa da seleção natural frente a outros fatores evolutivos, como a deriva genética e o isolamento geográfico. De acordo com essa abordagem, a seleção cumulativa de genes que conferem maior aptidão pode levar, ao longo do tempo, ao surgimento de novas espécies (especiação) e, em escalas temporais maiores, ao desenvolvimento de novas categorias taxonômicas (R.REEVES; E.ROWE, 2002).

Inspirados por esses processos naturais, os algoritmos genéticos simulam a evolução de populações de soluções potenciais para problemas de otimização. Por meio de operadores como reprodução, mutação e seleção, essas soluções evoluem ao longo das iterações pré-estabelecidas. Para tanto, é necessário estruturar um modelo que permita aos indivíduos representar soluções viáveis para o problema em questão. O funcionamento desses algoritmos pode ser sintetizado nos seguintes passos:

- a) Definição da população inicial: o algoritmo inicia com a geração de uma população inicial, composta, geralmente, por indivíduos criados de maneira aleatória. Esses indivíduos são codificados de forma a representar possíveis soluções para o problema;
- b) Avaliação da aptidão (*fitness*): cada indivíduo da população é avaliado de acordo com um critério de qualidade, definido por uma função de aptidão (*fitness*). Essa função mensura o quão adequada é a solução representada pelo indivíduo para resolver o problema;

- c) Seleção dos melhores indivíduos: com base nos valores obtidos pela função de aptidão, realiza-se a seleção dos indivíduos mais aptos. Esses indivíduos servirão como base para a formação da próxima geração. O objetivo é preservar as características mais promissoras, aumentando as chances de evolução do algoritmo.
- d) Reprodução e operadores genéticos: a próxima geração é formada por meio da aplicação de operadores genéticos, como cruzamento (*crossover*) e mutação. O cruzamento combina as características de dois ou mais indivíduos, enquanto a mutação promove alterações aleatórias, com o intuito de explorar novas regiões do espaço de soluções e evitar a estagnação em máximos ou mínimos locais.
- e) Iteração e convergência: o processo de avaliação, seleção e reprodução é repetido até que um critério de parada seja atendido. Esse critério pode ser definido pela obtenção de uma solução que satisfaça um nível mínimo de qualidade, pelo alcance de um número máximo de gerações ou pela estagnação do progresso na solução encontrada.

No Algoritmo 3 é descrito o pseudocódigo que implementa a lógica de otimização dos passos supracitados.

---

**Algoritmo 3:** Pseudocódigo do algoritmo GA (*Genetic Algorithm*)
 

---

**Input:** Função objetivo  $f(x)$ , tamanho da população  $n$ , taxa de mutação  $p_m$ , taxa de cruzamento  $p_c$ , número máximo de gerações  $G$

**Output:** Melhor solução encontrada  $g^*$

Gere uma população inicial de soluções  $P$  com  $n$  indivíduos;

Avalie a aptidão de cada indivíduo na população usando  $f(x)$ ;

**while** a condição de término não for satisfeita (e.g.,  $G$  gerações) **do**

Realize a seleção dos pais com base na aptidão;

Realize o cruzamento entre os pais selecionados com taxa  $p_c$ ;

Aplique mutação nos descendentes com taxa  $p_m$ ;

Avalie a aptidão dos novos indivíduos gerados;

Atualize a população  $P$  com os melhores indivíduos (e.g., elitismo ou substituição completa);

**end**

Identifique o melhor indivíduo da população como  $g^*$ ;

---

### 2.5.2.2 Algoritmo Genético de Ordenação Não-Dominada II

Seguindo a mesma lógica do algoritmo genético original, em (DEB; GOEL, 2001) foi proposto o Algoritmo Genético de Ordenação Não-Dominada II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II - NSGA-II). O NSGA-II ganhou destaque ao abordar de maneira mais eficiente os desafios associados à otimização multiobjetivo, mantendo a simplicidade computacional e a eficiência de execução. Além de utilizar operadores genéticos clássicos, como cruzamento e mutação, o algoritmo incorpora mecanismos especializados que o diferenciam de outros métodos. Esses mecanismos são fundamentais para garantir a ordenação e a diversidade das soluções geradas.

O primeiro mecanismo, denominado Ordenação Não-Dominada, organiza a população em múltiplas frentes hierárquicas, como F1, F2 e assim por diante. Cada frente é composta por soluções que não são dominadas mutuamente. A primeira frente (F1) corresponde ao conjunto de soluções que melhor se aproximam do frente de Pareto<sup>4</sup>, representando as alternativas

<sup>4</sup> O frente de Pareto representa o conjunto de soluções ótimas em problemas de otimização multiobjetivo, onde nenhuma solução pode ser melhorada em um objetivo sem que haja piora em pelo menos outro. Essas soluções são conhecidas como não-dominadas e refletem o equilíbrio entre os diferentes objetivos conflitantes.

mais equilibradas em relação aos objetivos conflitantes. Essa ordenação organiza as soluções de maneira hierárquica, facilitando a identificação das opções mais promissoras a cada iteração do algoritmo.

O segundo mecanismo, conhecido como Distância de Aglomeração (*Crowding Distance*), é empregado para manter a diversidade dentro de cada frente. Ele calcula a densidade das soluções vizinhas, atribuindo a cada indivíduo um valor que reflete o espaço ocupado ao seu redor. Este critério é particularmente útil quando as soluções estão concentradas em regiões específicas do espaço de busca, evitando a convergência prematura e garantindo uma boa distribuição das soluções ao longo do fronte de Pareto (DEB; GOEL, 2001).

A integração desses mecanismos com operadores genéticos tradicionais, como o Operador de Seleção por Torneio, permite ao NSGA-II criar uma nova geração de soluções que equilibra a exploração de regiões promissoras e a manutenção da diversidade. Esses aprimoramentos tornaram essa abordagem amplamente utilizada em problemas complexos, como planejamento urbano, alocação de recursos e engenharia de sistemas, onde é essencial encontrar soluções que atendam simultaneamente a múltiplos critérios conflitantes.

### 2.5.2.3 Algoritmo de Otimização Baseada em Biogeografia

Proposto inicialmente em (SIMON, 2008), o algoritmo de Otimização Baseada em Biogeografia (*Biogeography-Based Optimization* - BBO) tem suas raízes na CE e é inspirado nos modelos matemáticos da biogeografia. Esses modelos descrevem como espécies migram entre habitats, como novas espécies surgem e como outras se extinguem. No contexto do BBO, o termo "habitat" é utilizado para representar qualquer área geográfica isolada que seja adequada para sustentar populações biológicas. A partir de uma perspectiva computacional, habitats podem ser interpretados como soluções potenciais para problemas de otimização, enquanto espécies representam características dessas soluções.

Áreas geográficas com maior adequação ao abrigo de espécies biológicas são consideradas como possuindo um elevado Índice de Adequação do Habitat (*Habitat Suitability Index* - HSI). O HSI é influenciado por variáveis como precipitação, diversidade de vegetação, topografia, temperatura e extensão territorial. Essas variáveis são denominadas Variáveis do Índice de Adequação (*Suitability Index Variables* - SIV) e desempenham um papel crucial na caracterização da qualidade de um habitat. Assim, enquanto as SIV são variáveis independentes que determinam a habitabilidade de uma área, o HSI é a variável dependente que reflete a

adequação global de um habitat.

Habitats com HSI elevado tendem a abrigar uma grande diversidade de espécies e, conseqüentemente, apresentam taxas de emigração mais altas devido à saturação populacional. Por outro lado, habitats com baixo HSI possuem taxas elevadas de imigração, pois atraem espécies de habitats mais ricos, o que pode aumentar sua adequação ao longo do tempo. Entretanto, habitats com HSI persistentemente baixo frequentemente experimentam extinções de espécies, o que os torna mais dinâmicos em termos de distribuição populacional. Esse comportamento dinâmico dos habitats reflete a busca de equilíbrio natural e é fundamental para a analogia com problemas de otimização.

No contexto computacional, o BBO associa soluções de alta qualidade a habitats com HSI elevado e soluções de baixa qualidade a habitats com HSI reduzido. Soluções de alto HSI tendem a ser mais estáveis e resistem a mudanças significativas, enquanto soluções de baixo HSI aceitam características de soluções melhores, promovendo sua melhoria progressiva. A analogia com a biogeografia é utilizada para modelar um fluxo de informações eficiente entre soluções, o que possibilita o refinamento contínuo da população de candidatos (SIMON, 2008).

Assim como outros algoritmos evolutivos, o BBO é estruturado em dois passos principais: o compartilhamento de informações, implementado por meio da migração, e a mutação, que tem como objetivo aumentar a diversidade da população de soluções.

No BBO, a migração é um processo estocástico, onde as taxas de migração das soluções determinam probabilisticamente o compartilhamento de características entre as soluções da população. Para uma solução  $y_k$ , sua taxa de imigração  $\lambda_k$  é utilizada para decidir, de maneira estocástica, se cada uma de suas características será ou não substituída por uma característica proveniente de outra solução.

Caso a decisão favoreça a imigração, uma segunda etapa ocorre: a escolha da solução de emigração  $y_j$ . Esta solução é selecionada de forma probabilística, baseada em sua taxa de emigração  $\alpha_j$ . A migração pode ser formalmente representada pela Equação (2.20):

$$y_k(s) \leftarrow y_j(s), \quad (2.20)$$

onde  $s$  é um índice que representa a característica de uma solução.

A mutação, semelhante à implementada em outros algoritmos evolutivos, é um mecanismo probabilístico utilizado para modificar as características das soluções. Sua principal função é introduzir diversidade na população, prevenindo a convergência prematura para soluções

sub-ótimas. Nesse processo, toda a população de soluções passa pelos passos de migração e mutação antes que quaisquer soluções sejam substituídas. Esse procedimento exige o uso de uma população temporária, aqui denotada por  $z$ . No Algoritmo 4 é descrita a lógica básica que rege o funcionamento do BBO.

---

**Algoritmo 4:** Pseudocódigo do algoritmo BBO (*Biogeography-Based Optimization*)

---

**Input:** Tamanho da população  $N$ , população inicial de soluções candidatas  $y$ , onde  $y_k$  é a  $k$ -ésima solução candidata e  $y_k(s)$  é a  $s$ -ésima característica de  $y_k$ .

**Output:** População  $y$  atualizada.

**for** cada solução  $y_k$  **do**

    Defina a taxa de emigração  $\alpha_k$  proporcional à aptidão, com  $\alpha_k \in [0, 1]$ ;

**for** cada solução  $y_k$  **do**

        Defina a taxa de imigração  $\lambda_k = 1 - \alpha_k$ ;

**end**

**end**

Inicialize  $z \leftarrow y$ ;

**for** cada solução  $z_k$  ( $k = 1$  até  $N$ ) **do**

**for** cada característica da solução (índice  $s$ ) **do**

        Use  $\lambda_k$  para decidir se deve ou não imigrar para  $z_k$ ;

**if** a imigração foi decidida **then**

            Use  $\{\alpha_j\}$  para selecionar a solução de emigração, denotada como  $y_j$ ;

$z_k(s) \leftarrow y_j(s)$ ;

**end**

**end**

    Decida se deve ou não aplicar mutação em  $z_k$ ;

**end**

Atualize  $y \leftarrow z$ ;

---

No contexto do Algoritmo 4, a instrução “Use  $\lambda_k$  para decidir se deve ou não imigrar para  $z_k$ ” pode ser implementada através do Algoritmo 5.

---

**Algoritmo 5:** Decisão de Imigração no Algoritmo BBO
 

---

**Input:** Taxa de imigração  $\lambda_k$  para a solução  $z_k$

**Output:** Decisão de imigração para  $z_k$

**if**  $\lambda_k > rand(0, 1)$  **then**

    | Realizar migração para  $z_k$ ;

**end**

**else**

    | Não realizar migração;

**end**

---

Nesse pseudocódigo,  $rand(0, 1)$  representa um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo  $[0, 1]$ . De forma similar, a instrução “Use  $\{\varphi_i\}$  para selecionar a solução de emigração” pode ser realizada por meio de métodos de seleção baseados na aptidão. Métodos comuns incluem seleção por torneio, seleção por roleta ou qualquer outro método que seja proporcional à aptidão de  $y_i$ , já que  $\varphi_i$  é diretamente proporcional à qualidade da solução (MA *et al.*, 2017).

Em suma, o BBO combina de forma eficiente os passos de migração e mutação para explorar e refinar o espaço de soluções. A migração atua como um mecanismo de compartilhamento de informações entre soluções, enquanto a mutação assegura a diversidade na população. Com essas características, o BBO se destaca como uma técnica robusta e flexível para resolução de problemas de otimização em diversos domínios.

## 2.6 Geoprocessamento

As geotecnologias representam um conjunto de tecnologias destinadas à coleta, armazenamento, edição, processamento, análise e disponibilização de dados e informações georreferenciadas. Esse campo integra diversas soluções tecnológicas, abrangendo *hardware*, *software*, pessoal especializado (*peopleware*) e bases de dados (*dataware*). As principais geotecnologias incluem geoprocessamento, Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), cartografia digital, sensoriamento remoto por satélites, Sistemas de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), aerofotogrametria, geodésia, topografia clássica, entre outras.

O geoprocessamento, em particular, destaca-se como um ramo fundamental das geotecnologias, especialmente na constituição e operação dos SIGs. Ele pode ser definido como

o conjunto de métodos e técnicas teóricas e computacionais aplicadas à coleta, armazenamento, tratamento e processamento de dados georreferenciados, com o objetivo de gerar novas informações espaciais. A principal característica das informações georreferenciadas é o atributo de localização, que as vincula a posições específicas na superfície terrestre por meio de coordenadas geográficas (ZAIDAN, 2017).

### 2.6.1 *Sistemas de Informação Geográficas*

Os SIGs são uma das principais aplicações do geoprocessamento. Um SIG pode ser definido como um sistema integrado, composto por *softwares*, *hardwares*, dados e pessoal especializado, projetado para a coleta, armazenamento, análise e apresentação de dados geográficos. Apesar de, por vezes, ser confundido com um simples *software*, um SIG constitui um sistema abrangente que combina metodologias, tecnologias e pessoas para transformar dados geográficos em informações úteis para planejamento, gestão e tomada de decisão.

Uma definição clássica de SIG, apresentada em (BURROUGH; MCDONNELL, 1998), o descreve como um "sistema automatizado de coleta, armazenamento, manipulação e saída de dados cartográficos". Com o avanço das tecnologias, essa definição expandiu-se para incluir estruturas complexas que integram ferramentas computacionais, bancos de dados, técnicas analíticas e visualizações geográficas interativas. Assim, um SIG é mais do que um *software*; é um sistema robusto que permite a análise espacial, o suporte à decisão e o monitoramento de fenômenos geográficos. Na Figura 6 é apresentado um fluxograma que sintetiza esse processo.

Figura 6 – Fluxograma de um SIG



Fonte: Adaptado de (ZAIDAN, 2017).

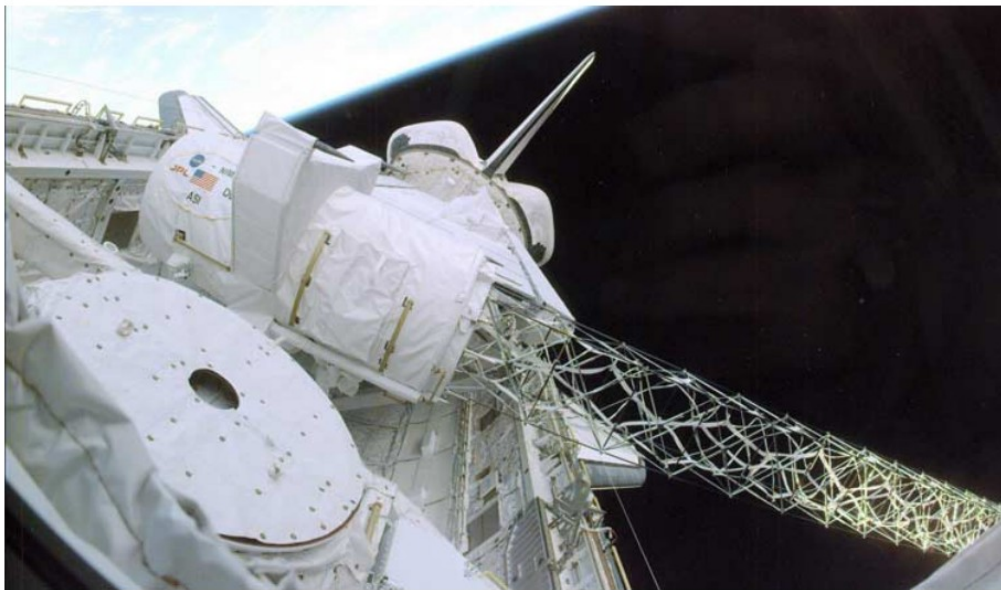
Dessa forma, pode-se considerar que o geoprocessamento e os SIGs desempenham um papel relevante dentro das geotecnologias, oferecendo ferramentas que possibilitam a análise espacial e a gestão territorial. Por meio da integração de dados geográficos provenientes de diversas fontes, como imagens de satélite, mapas, censos e dados climatológicos, os SIGs têm o potencial de transformar dados brutos em informações úteis para planejamento e monitoramento. Nesse contexto, as geotecnologias parecem assumir um papel cada vez mais importante no desenvolvimento de soluções para desafios relacionados ao espaço físico-geográfico, além de

aplicações na área da saúde pública (ARAÚJO *et al.*, 2008) e gestão urbana (FARINA, 2006).

### 2.6.2 Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM90

Em 2000, a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA), em parceria com a Agência Espacial Italiana (*Italian Space Agency* - ASI) e o Centro Aeroespacial Alemão (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* - DLR), realizou a missão *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), cuja finalidade principal foi coletar dados topográficos de alta precisão utilizando tecnologia de radar a bordo do ônibus espacial *Endeavour* (Figura 7). Essa iniciativa resultou na geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) global, que apresenta uma precisão vertical absoluta média de 16 metros e está disponível gratuitamente para a comunidade científica e outros interessados através dos arquivos tipo raster<sup>5</sup>.

Figura 7 – Compartimento de carga do Endeavour em posição de mapeamento.



Fonte: Adaptado de (FARR *et al.*, 2007).

O SRTM baseou-se na técnica de interferometria radar, na qual dois radares – um localizado no ônibus espacial e outro em um mastro de 60 metros de extensão – capturaram imagens simultâneas do relevo terrestre. Essa abordagem permitiu medir a diferença de fase entre os sinais refletidos pela superfície terrestre, possibilitando a construção de um modelo tridimensional da topografia. Durante a missão, foram coletados dados para cerca de 80% da

<sup>5</sup> Um arquivo raster é um tipo de arquivo usado para armazenar dados geoespaciais em formato matricial, composto por células ou pixels, cada uma com um valor representando informações de elevação.

superfície terrestre, abrangendo latitudes entre 56°S e 60°N, o que inclui regiões densamente habitadas e ecossistemas de grande relevância global (RABUS *et al.*, 2003).

O produto mais amplamente utilizado da SRTM é o modelo com resolução espacial de 90 metros, conhecido como SRTM 90. Este modelo, amplamente adotado em estudos científicos e aplicações práticas, fornece informações detalhadas sobre a variação altimétrica do terreno em uma escala global. Embora a resolução de 90 metros seja considerada moderada em comparação com tecnologias mais recentes, como o LIDAR<sup>6</sup>, sua abrangência e acessibilidade tornam o SRTM 90 uma ferramenta indispensável para diversas áreas do conhecimento.

Entre as principais aplicações do SRTM 90, destacam-se os estudos hidrológicos, nos quais é utilizado para delimitar bacias hidrográficas (SOBRINHO *et al.*, 2010), modelar redes de drenagem e prever padrões de escoamento superficial (CASTRO *et al.*, 2020). Além disso, o SRTM é amplamente utilizado em planejamento urbano, análise de riscos naturais, como deslizamentos de terra e enchentes, e estudos ambientais, incluindo o monitoramento de mudanças no uso e cobertura da terra. Em termos de telecomunicações, por exemplo, o modelo é utilizado para avaliar o impacto do relevo em enlaces de rádio e redes de comunicação sem fio, uma vez que permite prever obstruções de sinal causadas por elevações do terreno.

### **2.6.3 Uso da Linguagem Python no Geoprocessamento**

A linguagem de programação Python tem se destacado como uma das ferramentas mais versáteis e amplamente utilizadas no campo do geoprocessamento. Sua sintaxe simples, robustez e vasta biblioteca de pacotes especializados fazem dela uma escolha preferencial para aplicações que envolvem análise espacial, manipulação de dados geográficos e automação de fluxos de trabalho em sistemas de informações geográficas (SIGs) (LONGLEY *et al.*, 2015). As principais aplicações podem ser divididas em:

- Manipulação e processamento de dados geoespaciais: Python suporta bibliotecas como GeoPandas e Shapely, que facilitam o tratamento de dados vetoriais, e Rasterio, que permite a manipulação eficiente de dados raster. Com elas, é possível realizar tarefas como reamostragem, reprojeção de sistemas de coordenadas e análise topológica (LAWHEAD, 2013).
- Análise espacial e modelagem: essa linguagem também oferece pacotes como Scipy e

<sup>6</sup> LIDAR é a sigla para *Light Detection and Ranging*, uma tecnologia de sensoriamento remoto que usa feixes de laser para medir distâncias e movimentos.

NumPy para cálculos matemáticos e análises avançadas, que podem ser integrados ao geoprocessamento para modelar fenômenos espaciais. Além disso, bibliotecas como Matplotlib e Plotly permitem a visualização de dados em mapas e gráficos interativos (HUNTER, 2007).

- Interação com dados em nuvem e APIs<sup>7</sup>: facilita a interação com plataformas em nuvem e serviços baseados em APIs, como Google Earth Engine e Mapbox, permitindo acesso a dados geoespaciais de grande escala e processamento remoto (LAWHEAD, 2013).

---

<sup>7</sup> API, sigla para Application Programming Interface, refere-se a protocolos que permitem a comunicação entre *softwares*, sendo amplamente utilizada para acessar dados geoespaciais e integrar ferramentas no geoprocessamento.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão detalhados os procedimentos práticos empregados para a análise do problema proposto. Nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3, descreve-se o processo de seleção da área de estudo e o posicionamento das candidatas a antenas que irão compor os enlaces de rádio. Ademais, apresenta-se o procedimento de coleta dos dados geográficos e sua subsequente exportação para o *software* Matlab.

Na Seção 3.4, expõe-se, de forma detalhada, o desenvolvimento da função responsável por avaliar o custo associado à qualidade da rede de enlaces, abrangendo os critérios considerados nessa avaliação.

Por fim, nas Seções 3.5 e 3.6, são apresentados os parâmetros da rede de enlaces utilizados neste trabalho, bem como o papel dos algoritmos bioinspirados na abordagem do problema em questão.

#### 3.1 Definindo a Área Estudada

A elaboração de um projeto para uma rede de comunicação via rádio que utilize múltiplas antenas exige uma abordagem estruturada, a fim de assegurar resultados eficazes e eficientes. Primeiramente, é fundamental realizar um estudo detalhado da região de implantação. Essa análise pode ser conduzida por meio de visitas técnicas ao local ou utilizando ferramentas tecnológicas, como o *Google Earth*, combinadas com dados demográficos e geográficos disponibilizados por órgãos oficiais, como os censos demográficos.

No presente trabalho, o município de Sobral foi selecionado como área transmissora, enquanto o município de Massapê foi definido como área receptora. De acordo com o último censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) realizado em 2022, Sobral possui uma população estimada de 219.030 habitantes, enquanto Massapê apresenta 37.717 habitantes. A escolha dessas localidades foi motivada pela relevância socioeconômica de ambas na região e pela necessidade de melhorar a conectividade entre elas.

Outro aspecto crucial na etapa de planejamento é a análise das características geográficas do terreno entre os municípios. A região apresenta um relevo acidentado, com elevações e declives significativos conforme ilustra a Figura 8, o que aumenta a complexidade do projeto. Essas irregularidades podem influenciar diretamente na propagação do sinal de rádio, devido a fatores como obstruções naturais, impacto na zona de Fresnel e maior possibilidade de atenuação.

Portanto, a consideração dessas variáveis é indispensável para o dimensionamento adequado das antenas transmissoras e receptoras, bem como para a definição da viabilidade técnica do enlace.

Figura 8 – Exemplo do perfil de elevação entre o município de Sobral e Massapê para um único caminho



Fonte: Google Earth.

A análise criteriosa do relevo entre Sobral e Massapê não apenas identifica potenciais desafios, mas também possibilita a adoção de estratégias otimizadas para superar as limitações impostas pelas condições topográficas. Assim, o estudo contribui para a implementação de uma rede de comunicação eficiente, alinhada às necessidades locais e às boas práticas em telecomunicações.

### 3.2 Posicionamento das Antenas

Após a delimitação da região geográfica para o estudo, foram definidas 180 possíveis localizações para a instalação das antenas na área transmissora. Da mesma forma, outras 180 posições foram estabelecidas na área receptora. Cada antena foi identificada por um número sequencial associado a um identificador único: as transmissoras foram nomeadas no intervalo de T1 a T180, enquanto as receptoras receberam identificadores no formato R1 a R180. Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas representações gráficas das áreas selecionadas para ambas as regiões.

A seleção inicial dos locais considerou critérios relacionados à viabilidade prática para a instalação dos equipamentos. Foram avaliados aspectos como a acessibilidade física dos pontos, as condições do terreno e a proximidade a fontes de energia elétrica e infraestrutura básica necessária para a operação das antenas. Além disso, buscou-se evitar locais onde o sinal pudesse sofrer interferências severas, como regiões com edificações altas que poderiam obstruir a linha de visada entre os enlaces. Essa abordagem visa mitigar os impactos negativos de obstruções desconhecidas e maximizar o desempenho da rede.

A escolha das posições foi ainda fundamentada em análises preliminares de dados

Figura 9 – Posicionamento das antenas transmissoras



Fonte: Google Earth.

Figura 10 – Posicionamento das antenas receptoras



Fonte: Google Earth.

geográficos e topográficos, garantindo que os locais selecionados apresentem potencial para atender às exigências técnicas e operacionais do projeto. Essa estratégia permite um planejamento mais eficiente e embasa decisões futuras relacionadas à implementação e otimização da rede.

### 3.3 Coleta dos Dados Geográficos

Nesta seção, são apresentados os procedimentos empregados para a obtenção dos dados geográficos da área de estudo, com base nos conceitos e ferramentas associadas aos SIGs, conforme descrito na Seção 2.6.1.

### 3.3.1 *Exportação das coordenadas*

A etapa inicial para a análise dos dados geográficos consistiu na extração das coordenadas (latitude e longitude) das posições previamente estabelecidas para a instalação das antenas transmissoras e receptoras. Esse processo foi realizado por meio do *software* Google Earth, onde as posições foram marcadas manualmente e posteriormente exportadas em formato KML<sup>1</sup>.

Após a obtenção dos arquivos KML, foi desenvolvido um script em Python, descrito no Apêndice A, para processar os dados contidos nesses arquivos. O script converteu as informações de latitude e longitude em arquivos de texto no formato `.txt`, organizados de forma que as coordenadas de cada posição correspondessem ao ID da antena. Assim, os arquivos gerados mantiveram a ordem sequencial definida inicialmente, simplificando sua manipulação em etapas posteriores.

Foram exportados dois arquivos KML distintos: um contendo as posições das antenas transmissoras e outro com as localizações das antenas receptoras. Consequentemente, dois arquivos `.txt` foram gerados, cada um dedicado a um tipo de antena. Essa separação visa facilitar o tratamento dos dados em análises subsequentes, como a definição dos enlaces e a avaliação de desempenho da rede.

Embora existam diversas ferramentas amplamente utilizadas para o processamento de arquivos KML, como QGIS e ArcGIS, optou-se por utilizar o Python devido à sua flexibilidade e integração com bibliotecas especializadas em geoprocessamento. Essa escolha se alinha com o objetivo do presente trabalho de explorar o potencial do Python como ferramenta principal para a manipulação de dados geoespaciais.

### 3.3.2 *Obtenção dos dados de altitude*

Após a definição das coordenadas das antenas transmissoras e receptoras, o passo seguinte consistiu na obtenção dos valores de altitude para as posições candidatas. Essa etapa é essencial, pois permite mapear a elevação do terreno em cada localização proposta, um critério fundamental para o dimensionamento das alturas das antenas e para a análise de viabilidade dos enlaces de comunicação.

Para esse propósito, utilizou-se a *API Open Topo Data*, uma ferramenta que fornece dados de elevação em tempo real de maneira gratuita. Essa API utiliza informações provenientes

---

<sup>1</sup> KML (*Keyhole Markup Language*) é um formato baseado em XML utilizado para a representação e compartilhamento de dados geoespaciais, como pontos, linhas e polígonos, em plataformas como o Google Earth.

do modelo digital de elevação SRTM, previamente descrito na Seção 2.6.2, o que garante a precisão e a consistência dos valores de altitude obtidos.

O processo de consulta foi automatizado por meio de um script em Python, detalhado no Apêndice B. Esse script realizou a leitura das coordenadas armazenadas nos arquivos `.txt` exportados previamente e, em seguida, enviou requisições à API para obter os respectivos valores de altitude. Os resultados foram então armazenados em novos arquivos, garantindo a organização dos dados e a vinculação de cada valor de elevação à sua coordenada correspondente. A Tabela 3 apresenta parte dos dados obtidos por meio desse procedimento.

Tabela 3 – Amostra dos dados geográficos das antenas transmissoras.

ID	Latitude	Longitude	Altitude (m)
T1	-3.653799530301181	-40.36089347785983	86
T2	-3.655423414429262	-40.36158896246474	86
T3	-3.657573045762319	-40.36073082275203	79
T4	-3.654457237836919	-40.35921281804148	84
T5	-3.654883913775517	-40.35732206423661	83
T6	-3.657497731159738	-40.35817026254198	81
T7	-3.656192950313826	-40.35980721277965	84
T8	-3.654303865858441	-40.34728781791754	77
T9	-3.654534508832758	-40.34635426814115	72
T10	-3.654996658099388	-40.34696322772731	73
...	...	...	...
T180	-3.681074880889394	-40.32497172949946	61

Fonte: Próprio autor.

Embora a *API Open Topo Data* seja uma ferramenta acessível e eficiente, ela possui restrições em relação à quantidade de requisições permitidas por segundo. Para contornar essas limitações e garantir a integridade do processo de coleta, o script implementado incluiu um mecanismo de "retries", capaz de lidar com erros temporários, como falhas de comunicação (e.g., "bad gateway"), sem comprometer o acesso aos dados. Esse mecanismo assegurou a continuidade do processo, mesmo diante de eventuais indisponibilidades temporárias da API.

### 3.3.3 *Análise topográfica e determinação de obstáculos*

Com base nos dados geográficos das posições candidatas para a rede de enlaces, a próxima etapa do projeto consistiu na análise topográfica da região existente entre as áreas transmissoras e receptoras. Partindo do princípio de que qualquer antena transmissora pode se conectar a qualquer antena receptora, sendo que ambas as áreas contêm 180 antenas cada, o

número total de possíveis conexões é de 32.400. O objetivo principal desta etapa foi avaliar cada uma dessas conexões e extrair informações essenciais para o planejamento do sistema, tais como a altitude do maior obstáculo presente ao longo da linha de visão e as coordenadas (latitude e longitude) de sua localização.

Para realizar essa análise, foi empregada a técnica de interpolação de coordenadas. Essa técnica permite calcular pontos intermediários entre dois locais conhecidos em um espaço tridimensional (latitude, longitude e altitude). Essencialmente, ela gera uma "linha de visão" entre o ponto de origem e o destino, dividindo-a em segmentos igualmente espaçados. A principal motivação por trás dessa técnica se deve ao fato do arquivo raster possuir os dados de altitude da região, mas não é capaz de identificar por conta própria as coordenadas do ponto de maior elevação. As Equações (3.1) e (3.2) demonstram como a interpolação linear foi utilizada para calcular os valores de latitude e longitude desses pontos intermediários:

$$\text{lat}[i] = \text{lat}_1 + i \cdot \frac{(\text{lat}_2 - \text{lat}_1)}{n - 1}, \quad (3.1)$$

$$\text{lon}[i] = \text{lon}_1 + i \cdot \frac{(\text{lon}_2 - \text{lon}_1)}{n - 1}, \quad (3.2)$$

onde:

- $\text{lat}_1$  e  $\text{lon}_1$  correspondem à latitude e longitude do ponto inicial;
- $\text{lat}_2$  e  $\text{lon}_2$  correspondem à latitude e longitude do ponto final;
- $n$  é o número total de pontos, incluindo os extremos (inicial e final);
- $i$  é o índice do ponto intermediário, variando de 0 a  $n - 1$ .

Essas equações calculam os incrementos necessários para interpolar os valores ao longo da linha de visão, garantindo uma distribuição uniforme dos pontos. Assim, é possível determinar as posições exatas para consulta no arquivo raster (detalhado na Seção 2.6.2) que contém os dados de elevação da região.

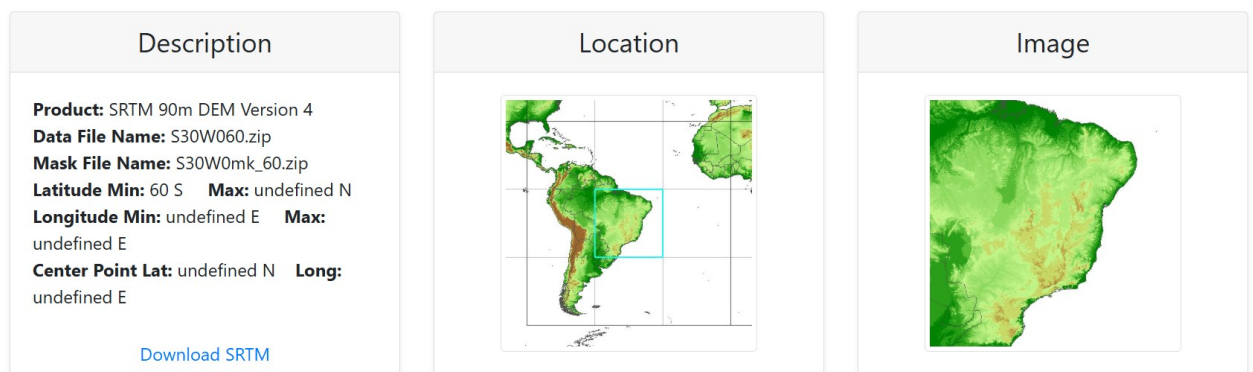
Com base nessa metodologia, foi desenvolvido um código em Python (Apêndice C) que aplica a interpolação linear entre cada par de antenas transmissoras e receptoras, considerando  $n = 150$  pontos intermediários para maximizar a precisão<sup>2</sup>. Em seguida, o código consulta a altitude correspondente a cada ponto interpolado e registra o maior valor encontrado, além de

<sup>2</sup> A distância média entre as cidades é de aproximadamente 20 Km, onde os testes pré-liminares apresentaram uma precisão satisfatória para determinação dos obstáculos.

suas coordenadas (latitude e longitude). Esse procedimento permite identificar o obstáculo mais crítico ao longo de cada linha de visão.

O código utiliza um arquivo raster da região, obtido gratuitamente através da plataforma CGIAR-CSI (*Consortium for Spatial Information*), que disponibiliza dados derivados do projeto SRTM. O arquivo raster, no formato .tif, pode ser acessado no site oficial da CGIAR-CSI, bastando selecionar a área de interesse no mapa e efetuar o download. A Figura 11 ilustra a interface da plataforma e as opções disponíveis para download.

Figura 11 – Página de download do arquivo raster.



Fonte: CGIAR-CSI.

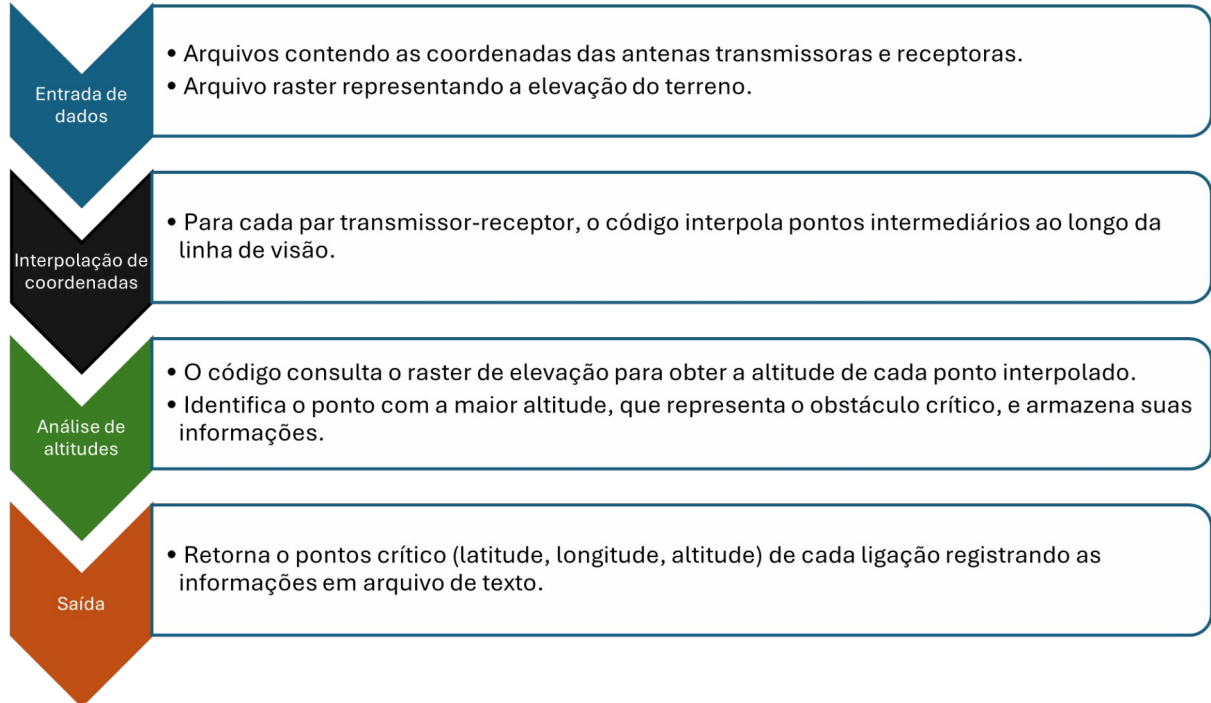
Nessa etapa, a preferência por utilizar o arquivo raster, em vez da *API Open Topo Data*, foi motivada pelas limitações práticas de requisições. Com 150 pontos intermediários por conexão e 32.400 conexões no total, seriam necessárias aproximadamente 5 milhões de requisições, número que excede em muito os limites da API. Por outro lado, o arquivo raster, uma vez feito o seu download, pode ser acessado localmente de forma ilimitada, otimizando o processo de análise.

Além do arquivo raster, o código requer como entrada as coordenadas das antenas transmissoras e receptoras, previamente armazenadas em arquivos.txt conforme descrito na Seção 3.3.1. As ligações entre as antenas foram analisadas de forma sistemática, processando todas as conexões de cada transmissora com as receptoras em ordem crescente (de T1 para R1 a R180, depois T2, e assim por diante). Os resultados foram armazenados em um arquivo .txt, onde cada linha representa uma conexão específica. A relação entre a linha do arquivo e as antenas conectadas é dada pela Equação (3.3):

$$Tx-Rx = (Tx - 1) \cdot 180 + Rx. \quad (3.3)$$

O fluxograma da Figura 12 apresenta as etapas principais para a implementação do código e sua lógica básica de funcionamento.

Figura 12 – Fluxograma do processo para análise dos obstáculos.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4 exhibe parte dos resultados obtidos.

Tabela 4 – Amostra dos dados geográficos dos obstáculos.

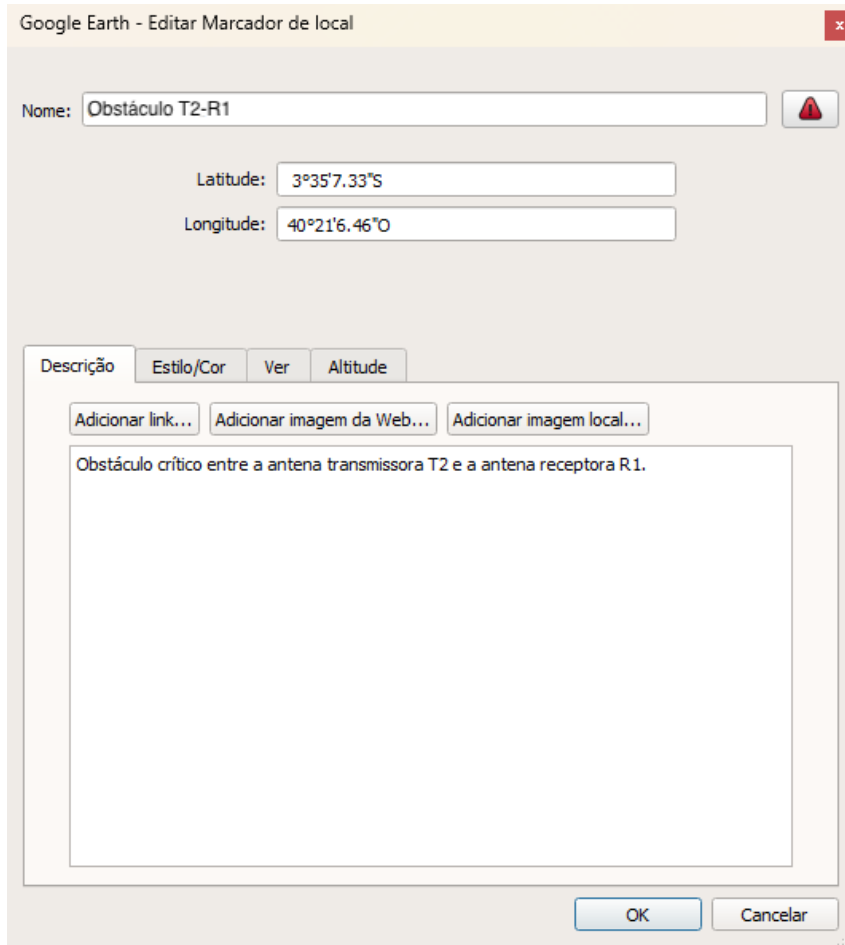
Ligação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
T1-R1	-3.5755307657595856	-40.350274485288230	144
T1-R2	-3.5755354963606463	-40.349992782533064	139
T1-R3	-3.5916415602971057	-40.352014339895620	136
T1-R4	-3.585089702575570	-40.351507404736616	143
T1-R5	-3.5850691641982007	-40.351241933020420	138
...	...	...	...
T2-R1	-3.5853685250614420	-40.351793456235896	149
T2-R2	-3.5853726991212014	-40.351544894981330	144
T2-R3	-3.5853647885413280	-40.351297446714650	138
T2-R4	-3.5857193719313565	-40.351777082440560	147
T2-R5	-3.5856988335539874	-40.351511610724366	142

Fonte: Próprio autor.

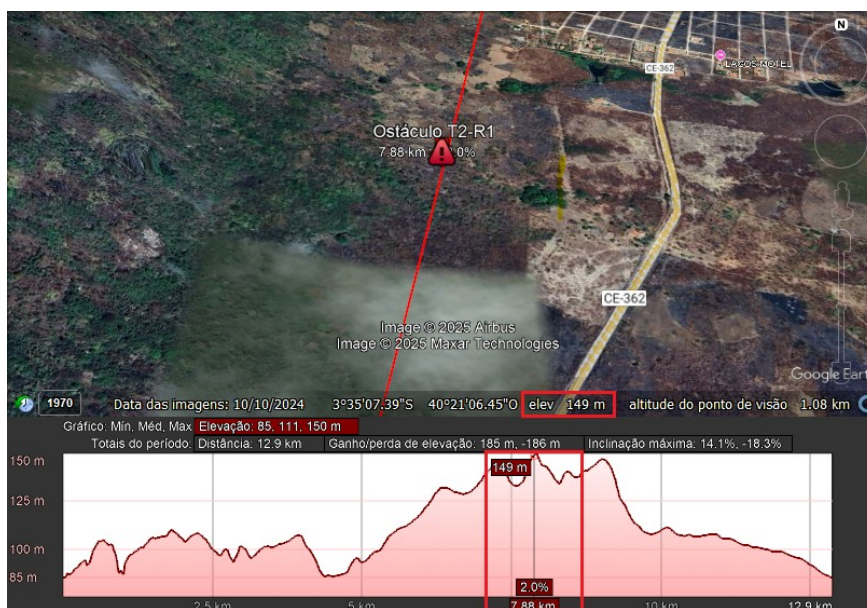
Já nas Figuras 13a e 13b é ilustrado de forma prática a localização do obstáculo crítico na ligação T2-R1. Para essa conexão, o algoritmo retornou o valor exato da altitude em 149 metros, demonstrando a eficácia do método para mapear a topografia da área.

Figura 13 – Demonstração do ponto crítico da ligação T2-R1.

(a) Inserindo as coordenadas do obstáculo crítico encontradas pelo código.



(b) Localização do ponto crítico no Google Earth apontada pelo marcador.



Fonte: Google Earth.

### 3.3.4 Importação dos dados para o Matlab

Conforme detalhado nas Seções 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, todos os dados geográficos obtidos foram armazenados em arquivos no formato `.txt`, com o objetivo de facilitar sua manipulação e transferência. O passo seguinte consistiu em importar esses dados para o *software* Matlab, escolhido para execução deste trabalho.

A ferramenta nativa do Matlab denominada *Import Data* foi empregada para realizar essa importação. Por meio desse recurso, os dados relacionados às antenas transmissoras, receptoras e obstáculos foram convertidos em matrizes contendo informações de latitude, longitude e altitude. Durante esse processo, foi preservada a ordem de armazenamento original dos arquivos `.txt`, de forma que cada linha do arquivo correspondia diretamente a uma linha da matriz gerada. A Figura 14a ilustra parte desse procedimento, enquanto a Figura 14b apresenta as matrizes já convertidas para o formato `.mat` que é nativo do Matlab.

Após a importação, as matrizes foram armazenadas no disco local, permitindo que fossem carregadas no *workspace* do Matlab sempre que necessário durante o desenvolvimento e execução do código principal. Essa abordagem garante maior praticidade no acesso aos dados e otimiza o tempo de processamento.

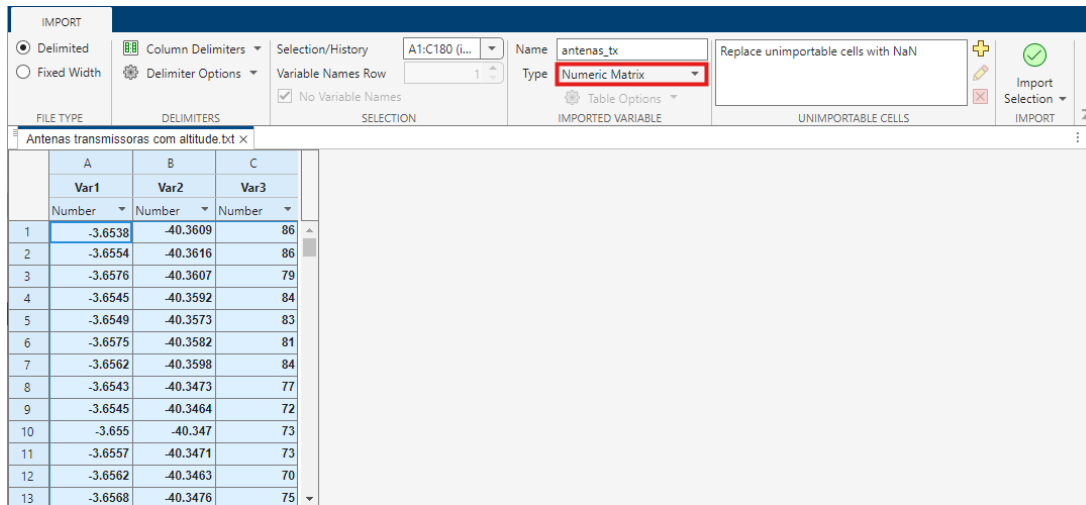
Adicionalmente, a matriz referente aos obstáculos pode ser consultada de maneira eficiente utilizando a relação matemática estabelecida na Equação (3.3). Essa relação assegura o acesso preciso aos dados geográficos dos obstáculos ao longo do código principal, contribuindo para a consistência e confiabilidade dos resultados obtidos.

## 3.4 Avaliação da Rede de Enlaces

Conforme abordado na Seção 2.4, o dimensionamento de enlaces de rádio frequência requer a consideração de múltiplos fatores que influenciam diretamente a qualidade e eficiência da comunicação. Em redes compostas por múltiplos enlaces, onde existe potencial para interferência cruzada entre antenas, a complexidade da análise é ampliada. Nesta seção, é detalhado o desenvolvimento de uma função no MATLAB destinada a avaliar a rede de enlaces com base em múltiplos critérios. Como resultado, a função atribui um valor de custo adimensional ao conjunto de enlaces, representando a eficiência e viabilidade da configuração analisada. Nas Seções 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5 e 3.4.6 são apresentados todos os critérios considerados nessa avaliação.

Figura 14 – Processo de importação de dados para o Matlab.

(a) Importando os dados do arquivo `.txt` com a função `Import Data`.



(b) Matrizes com os dados importados no formato `.mat`.

Name	Value	Size	Class
antenas_rx	180×3 double	180×3	double
antenas_tx	180×3 double	180×3	double
obstaculos	32400×3 double	32400×3	double

Fonte: Matlab.

### 3.4.1 Distância entre os enlaces

O primeiro critério avaliado é a soma das distâncias geográficas totais entre os enlaces. Este aspecto possui relevância significativa, pois distâncias maiores implicam em maior atenuação do sinal, conforme descrito pela equação de Friis (Equação 2.1). Essa atenuação pode aumentar o custo operacional devido à necessidade de compensação, seja por meio de amplificação de sinal ou retransmissão. Portanto, priorizar distâncias mais curtas entre as antenas é uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência da transmissão, reduzindo as atenuações do sinal.

O cálculo das distâncias geográficas foi realizado utilizando a fórmula de Haversine, amplamente empregada para determinar a distância entre dois pontos na superfície esférica com base em suas latitudes e longitudes (MARIA *et al.*, 2020). A fórmula considera a curvatura da Terra, proporcionando resultados precisos, especialmente em enlaces de longa distância. A Equação (3.4) apresenta a fórmula de Haversine:

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}}, \quad (3.4)$$

onde:

- $d$ : distância geográfica entre os dois pontos;
- $r$ : raio médio da Terra (aproximadamente 6.371 km);
- $\varphi_1, \varphi_2$ : latitudes dos pontos inicial e final, em radianos;
- $\lambda_1, \lambda_2$ : longitudes dos pontos inicial e final, em radianos.

A fórmula de Haversine é particularmente útil devido à sua simplicidade e precisão, permitindo integrar o cálculo de distâncias diretamente no processo de avaliação da rede. Este critério é essencial para garantir que os enlaces estejam alinhados às boas práticas de planejamento de redes, reduzindo custos e promovendo uma comunicação eficiente.

### 3.4.2 Zona de Fresnel e altura das antenas

Conforme descrito na Seção 2.4.3, a Zona de Fresnel corresponde a uma região elíptica que se estende ao redor do eixo direto entre a antena transmissora e a receptora. Esta região desempenha um papel fundamental na propagação do sinal, uma vez que obstruções dentro dela, como edificações, vegetação ou formações geográficas, podem provocar difração, interferência e consequente degradação da qualidade do enlace. Para garantir um desempenho adequado, é essencial que a primeira Zona de Fresnel esteja completamente desobstruída, sobretudo quando considerado o fator de curvatura terrestre  $k = 4/3$ , conforme discutido na Seção 2.4.2 e estabelecido para este trabalho.

Com base nesse princípio, foi proposta a análise da altura mínima necessária das antenas para assegurar a desobstrução completa da primeira Zona de Fresnel, cujo raio é calculado pela Equação (2.9). Inicialmente, identificou-se a posição do obstáculo crítico, ou seja, o ponto ao longo do enlace onde a obstrução é mais severa através dos dados obtidos na Seção 3.3.3. A partir dessa identificação, foi calculada a altura mínima requerida para desobstruir a Zona de Fresnel nesse ponto específico e garantir a propagação eficiente ao longo de todo o enlace. Essa análise foi realizada para cada enlace da rede, o que garantiu avaliar o custo total do conjunto.

É importante enfatizar que os valores obtidos não representam a altura final das antenas, pois esse dimensionamento depende de diversos outros fatores, como segurança estrutural, legislação local e capacidade de expansão da rede. O objetivo dessa abordagem foi determinar o

valor mínimo necessário para a desobstrução, um parâmetro que está diretamente relacionado ao custo total de implementação da rede de enlaces. Assim, a consideração da altura mínima oferece uma estimativa preliminar do impacto das obstruções na viabilidade técnica e econômica do projeto.

### 3.4.3 Atenuações na transmissão

Outro aspecto crucial no dimensionamento de uma rede de enlaces de telecomunicações é o cálculo das atenuações sofridas pelo sinal durante sua propagação. Essas perdas, abordadas nas Seções 2.3.1 e 2.4, foram analisadas a partir de dois fatores principais: a atenuação no espaço livre e a atenuação causada por chuvas.

O cálculo da atenuação no espaço livre foi realizado com base na Equação (2.1), que descreve a perda de sinal em função da distância, frequência e outros parâmetros do enlace. Esta forma de atenuação é inevitável em qualquer sistema de transmissão sem fio e foi amplamente discutida na fundamentação teórica deste trabalho.

Para considerar os efeitos da precipitação na viabilidade da rede, utilizou-se a modelagem descrita na Recomendação ITU-R P.838-3, conforme detalhado na Seção 2.4.4.1. A atenuação causada por chuvas é calculada pela Equação (3.5):

$$A_C = \mu_R \cdot D_{ef} \quad (3.5)$$

Nesta equação:

- $\mu_R$  representa a atenuação específica (em dB/km), calculada com base na taxa de precipitação  $R$  (mm/h) e nos coeficientes  $ka$  e  $\alpha$ , que variam conforme a frequência do enlace;
- $D_{ef}$  é a distância efetiva do enlace, expressa em quilômetros;
- $A_C$  é a atenuação total causada pela chuva (em dB).

Os coeficientes  $ka$  e  $\alpha$ , necessários para calcular  $\mu_R$ , foram extraídos da Tabela 9, que relaciona esses parâmetros às frequências de operação da rede. Para a taxa de precipitação  $R$ , foi considerado o valor de 0,2734 mm/h<sup>3</sup>, obtido a partir de dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a região estudada.

As perdas por difração não foram incluídas nesta análise, em conformidade com a Recomendação ITU-R P.530-17. Segundo o documento, para frequências superiores a 2 GHz, é

<sup>3</sup> Valor referente a média anual da área estudada.

possível mitigar a atenuação por difração instalando antenas em alturas suficientes para garantir a zona de Fresnel desobstruída, assegurando a disponibilidade do enlace.

Para fins de cálculo e implementação, optou-se por trabalhar com as perdas em escala linear, ao invés de utilizá-las diretamente em decibéis. Essa decisão foi motivada pela necessidade de evitar inconsistências no somatório de perdas, considerando que, na escala de decibéis, valores negativos são frequentes e poderiam levar a interpretações equivocadas. Assim, ao somar as atenuações de cada enlace e incorporá-las ao custo total da rede, garantiu-se uma análise consistente e sem contradições matemáticas.

#### 3.4.4 Interferências e *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)*

Em redes de telecomunicações que envolvem múltiplas antenas transmissoras e receptoras, um fator crítico a ser analisado é a interferência que um enlace pode causar em outro. Essa interferência pode comprometer significativamente a qualidade do sinal recebido, dificultando a viabilidade da comunicação. Para avaliar esse aspecto, utilizou-se o conceito de *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)*, um parâmetro amplamente empregado para medir a qualidade do sinal recebido com base nas interferências e ruídos presentes no sistema.

O cálculo do SINR foi realizado por meio da Equação (3.6):

$$\text{SINR} = \frac{P_s}{I + N}, \quad (3.6)$$

em que:

- $P_s$  é a potência do sinal desejado recebido no receptor;
- $I$  representa a soma das potências de interferência provenientes de outros transmissores que não pertencem ao enlace desejado;
- $N$  é a potência do ruído térmico do sistema, expresso em watts, calculado como  $N = k \cdot T \cdot B$ , onde  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$ , J/K),  $T$  é a temperatura do sistema em Kelvin e  $B$  é a largura de banda do sinal em Hz.

Nesta etapa, as interferências foram calculadas analisando o efeito de cada transmissor sobre os receptores dos demais enlaces, por meio da equação de Friis. Embora os valores absolutos das interferências sejam bastante reduzidos – devido às grandes distâncias entre os transmissores e receptores – esse critério foi adotado para aproximar a análise do cenário real do problema.

Em suma, valores baixos de SINR indicam que o sinal desejado está significativamente degradado por interferências e ruídos, o que prejudica a integridade da comunicação e pode levar à perda de dados ou à necessidade de retransmissões. Por outro lado, valores elevados de SINR indicam uma comunicação confiável, com baixa interferência e ruído residual. Assim, manter um SINR elevado é essencial para garantir a eficiência e a qualidade da rede.

Após calcular o SINR total da rede de enlaces, foi implementada uma função de penalização, demonstrada no Algoritmo 6 para enlaces com valores de SINR abaixo de um limiar previamente definido. Essa penalização visa refletir, no cálculo do custo total da rede, o impacto negativo de enlaces cuja qualidade de sinal seja inadequada.

---

**Algoritmo 6:** Pseudocódigo para penalização do SINR

---

**Input:** *sinrTotal*: valor total do SINR

**Output:** *sinrA justado*: valor do SINR ajustado após penalização

**if** *sinrTotal*  $\leq$   $-5\text{dB}$  **then**

*sinrA justado*  $\leftarrow 10^3$  ; // Penalização severa para valores  
excessivamente baixos

**else**

*sinrA justado*  $\leftarrow \frac{1}{1+\text{sinrTotal}}$  ; // Penalização menor para altos valores de  
SINR

**end**

**return** *sinrA justado*;

---

Inicialmente, optou-se por penalizar as combinações cujo SINR seja inferior a 5 dB, atribuindo-lhes um valor de penalização igual a  $10^3$ . Essa estratégia visa manter o custo total baixo para redes de boa qualidade e, ao mesmo tempo, elevar significativamente o custo associado àquelas combinações que apresentem um desempenho insatisfatório, evidenciando a má qualidade da rede testada. Dessa forma, busca-se incentivar a seleção de redes que priorizem a robustez dos sinais e a mitigação das interferências. Além disso, para o cálculo do custo final de cada enlace, foram considerados dois fatores principais:

- O valor absoluto da potência interferente total ( $I$ );
- O valor ajustado do SINR após a aplicação da função de penalização.

### 3.4.5 Escalabilidade

A escalabilidade é um aspecto fundamental no planejamento e na manutenção de sistemas de telecomunicações, pois avalia a capacidade da rede de absorver um aumento no número de enlaces ou dispositivos sem comprometer seu desempenho. Redes escaláveis conseguem operar de forma eficiente mesmo diante do aumento da carga, garantindo a flexibilidade necessária para atender a demandas futuras.

Para a análise da escalabilidade, adotou-se o conceito de dispersão dos enlaces. Em geral, valores elevados deste coeficiente indicam uma menor escalabilidade, pois uma alta densidade de conexões dificulta a incorporação de novos enlaces sem que ocorra um aumento na interferência.

Neste estudo, a dispersão média é calculada utilizando a função nativa do Matlab *pdist*<sup>4</sup>, que determina todas as distâncias entre pares de pontos em um conjunto de coordenadas. Redes nas quais as antenas apresentam baixa dispersão tendem a apresentar maior dificuldade de expansão, uma vez que a proximidade excessiva entre os dispositivos contribui para a geração de interferências e restringe a flexibilidade da rede. O custo de escalabilidade é, então, determinado por meio da função descrita no Algoritmo 7.

---

<sup>4</sup> A função *pdist* do MATLAB calcula as distâncias entre todos os pares de observações em uma matriz de dados (onde cada linha é uma observação), utilizando diversas métricas (como euclidiana, *Manhattan*, etc.). O resultado é um vetor com as  $\frac{m}{2}$  distâncias para um conjunto com  $m$  observações, sendo amplamente empregada em análises de agrupamento e reconhecimento de padrões.

---

**Algoritmo 7:** Pseudocódigo para cálculo do custo de escalabilidade
 

---

**Input:** *posicao*: matriz ( $nLinks \times 2$ ) com as posições dos enlaces [TX, RX]  
*transmissoras*: matriz ( $N \times 2$ ) com coordenadas ( $x, y$ ) das antenas transmissoras  
*receptoras*: matriz ( $M \times 2$ ) com coordenadas ( $x, y$ ) das antenas receptoras

**Output:** *custoEscalabilidade*: custo baseado na dispersão espacial dos enlaces

Extraia os índices dos transmissores e receptores de *posicao*;  
 Obtenha as coordenadas ( $x, y$ ) das antenas transmissoras e receptoras selecionadas;

**if** número de transmissores selecionados > 1 **then**  
 | Calcule a dispersão média entre transmissores usando a distância euclidiana;  
**end**

**else**  
 | Defina a dispersão como 0;  
**end**

**if** número de receptores selecionados > 1 **then**  
 | Calcule a dispersão média entre receptores usando a distância euclidiana;  
**end**

**else**  
 | Defina a dispersão como 0;  
**end**

Calcule a maior distância possível entre quaisquer transmissores;  
 Calcule a maior distância possível entre quaisquer receptores;  
 Normalize a dispersão dos transmissores dividindo pela máxima distância;  
 Normalize a dispersão dos receptores dividindo pela máxima distância;  
 $custoEscalabilidade \leftarrow 1 - \frac{(dispersão\ normalizada\ TX + dispersão\ normalizada\ RX)}{2}$ ;  
**return** *custoEscalabilidade*;

---

### 3.4.6 Área de cobertura

A área de cobertura é outro fator essencial considerado no planejamento da rede de enlaces. Este critério avalia a extensão geográfica coberta pelas antenas receptoras, normalizada em relação a uma área máxima pré-definida. Uma ampla cobertura é desejável, pois permite atender de forma eficiente a usuários distribuídos em diferentes locais de uma região. Redes com

uma área de cobertura maior tendem a ser mais eficazes para atender a uma base de usuários dispersa, otimizando a alocação de recursos e a conectividade.

Neste trabalho, o cálculo da área de cobertura foi realizado utilizando o conceito de menor polígono convexo<sup>5</sup>, também conhecido como casco convexo. A área desse polígono é então normalizada em relação à área máxima fornecida como parâmetro de entrada, permitindo uma avaliação quantitativa do desempenho em termos de cobertura.

O Algoritmo 8 apresenta a lógica implementada para o cálculo da área de cobertura normalizada.

---

**Algoritmo 8:** Pseudocódigo para o cálculo da área de cobertura

---

**Input:** *coordsReceptoras*: Coordenadas das antenas receptoras ( $N \times 2$  matriz de  $[x, y]$ ),

*maxAreaPossivel*: Área máxima esperada para normalização

**Output:** *areaCoberturaNormalizada*: Área de cobertura normalizada no intervalo  $[0, 1]$

**if** número de linhas em *coordsReceptoras*  $\geq 3$  **then**

    Calcule o polígono convexo (*convex hull*) que engloba as antenas receptoras;

    Calcule a área do polígono convexo, *areaCobertura*;

**end**

**else**

    Defina *areaCobertura* = 0;

**end**

Normalize a área de cobertura:

$$areaCoberturaNormalizada \leftarrow \frac{areaCobertura}{maxAreaPossivel}$$

Garanta que *areaCoberturaNormalizada* esteja no intervalo  $[0, 1]$ :

$$areaCoberturaNormalizada \leftarrow \max(0, \min(1, areaCoberturaNormalizada))$$

**return** *areaCoberturaNormalizada*;

---

Esse pseudocódigo pode ser descrito em etapas, como detalhado a seguir:

- Entrada de dados: as coordenadas das antenas receptoras (*coordsReceptoras*) são fornecidas em forma de matriz, juntamente com o valor da área máxima esperada (*maxAreaPossi-*

<sup>5</sup> Figura geométrica em que todos os ângulos internos são menores ou iguais a  $180^\circ$ , garantindo que qualquer linha reta conectando dois pontos dentro do polígono permaneça completamente contida nele.

- vel);
- Cálculo do polígono convexo: caso existam ao menos três antenas receptoras, é determinado o menor polígono convexo (*convex hull*) que engloba todas as coordenadas. A área desse polígono é então calculada;
  - Tratamento de casos especiais: para situações em que o número de antenas receptoras seja inferior a três, a área de cobertura é atribuída como zero, uma vez que não é possível formar um polígono;
  - Normalização: a área calculada é dividida pela área máxima fornecida, resultando em um valor normalizado no intervalo  $[0, 1]$ ;
  - Limitação dos valores: para garantir a consistência, o valor da área normalizada é ajustado para permanecer dentro do intervalo  $[0, 1]$ , corrigindo possíveis inconsistências numéricas;
  - Saída: o algoritmo retorna a área de cobertura normalizada, que reflete a eficiência espacial da distribuição das antenas receptoras.

É importante destacar que a área de cobertura aqui calculada não reflete a cobertura efetiva das antenas, pois esta depende de diversos fatores, como potência de transmissão, limiar do receptor, nível de ruído e interferências. O objetivo desta análise é incorporar um fator adicional para avaliar a rede de forma holística, incentivando a busca por combinações de enlaces que proporcionem uma disposição espacial mais eficiente.

### 3.4.7 Estrutura final

Após a definição de todos os parâmetros para a análise da rede de enlaces, foi desenvolvida uma função consolidada para o cálculo do custo total da rede. Essa função considera todos os critérios abordados nas Seções 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5 e 3.4.6. A estrutura completa do código pode ser consultada no Apêndice D.

De maneira geral, o código realiza o cálculo do custo da rede para diferentes combinações aleatórias de antenas, permitindo a avaliação comparativa de múltiplas configurações. Para assegurar que a análise reflita com maior precisão a realidade operacional da rede, foi atribuída uma ponderação específica a cada critério. Dessa forma, o custo final da rede é obtido a partir da soma ponderada de todos os fatores, conforme descrito na Equação (3.7).

$$\text{custoTotal} = \omega_1 \cdot \text{custoPerdas} + \omega_2 \cdot \text{custoDistancia} + \omega_3 \cdot \text{custoAltura} + \omega_4 \cdot \text{custoInterferencias} \\ + \omega_5 \cdot \text{custoSINR} + \omega_6 \cdot \text{custoEscalabilidade} + \omega_7 \cdot \text{custoCobertura}. \quad (3.7)$$

Os pesos  $\omega_i$  são parâmetros ajustáveis que refletem a importância relativa de cada critério no contexto da otimização da rede. A seguir, cada um dos componentes da equação é descrito brevemente:

- custoPerdas ( $\omega_1$ ): representa as perdas de propagação do sinal, incluindo atenuação por distância e interferências pluviométricas;
- custoDistancia ( $\omega_2$ ): mede a influência da separação física entre os pontos de transmissão e recepção;
- custoAltura ( $\omega_3$ ): considera a viabilidade da altura das antenas transmissoras e receptoras para minimizar obstruções e maximizar a eficiência da propagação do sinal;
- custoInterferencias ( $\omega_4$ ): avalia o impacto da interferência de sinais externos que podem degradar a qualidade da comunicação;
- custoSINR ( $\omega_5$ ): mede a relação sinal-ruído-interferência (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), que é um indicador fundamental da qualidade do enlace;
- custoEscalabilidade ( $\omega_6$ ): reflete a capacidade da rede de expandir-se de forma eficiente, minimizando impactos negativos decorrentes de uma densidade elevada de conexões;
- custoCobertura ( $\omega_7$ ): indica a área geográfica efetivamente atendida pela rede, incentivando uma distribuição mais abrangente dos enlaces.

A formulação apresentada possibilita uma avaliação equilibrada da rede, considerando tanto os aspectos técnicos quanto os operacionais. A definição dos pesos  $\omega_i$  pode ser ajustada de acordo com as prioridades específicas do projeto, proporcionando maior flexibilidade na adaptação do modelo a diferentes cenários. Além disso, para manter o equilíbrio entre as escalas dos diversos componentes de custo, foi adotado um fator multiplicativo para cada tipo de custo, padronizando os valores e contribuindo de forma equitativa para o custo final. Essa abordagem favorece a otimização estratégica da rede, buscando alcançar o melhor compromisso entre todos os critérios considerados.

### 3.5 Parâmetros da rede

Para a configuração da rede de enlaces, foram adotados os parâmetros descritos nas Seções 2.3.1 e 3.4, conforme detalhado a seguir:

- **Quantidade total de enlaces:** 5;
- **Potência das antenas transmissoras ( $P_t$ ):** 30 dBm;
- **Ganho das antenas transmissoras ( $G_t$ ):** 45 dB;

- **Ganho das antenas receptoras ( $G_r$ ):** 45 dB;
- **Frequência de operação ( $f$ ):** 15 GHz;
- **Largura de banda ( $B$ ):** 100 MHz;
- **Temperatura do sistema ( $T$ ):** 290 K;
- **Constante de Boltzmann ( $k$ ):**  $1.38 \times 10^{-23}$ , J/K
- **Pesos ( $\omega_i$ ):** [ $\omega_1 = 4, \omega_2 = 1, \omega_3 = 3, \omega_4 = 4, \omega_5 = 3, \omega_6 = 2, \omega_7 = 2$ ];

Adicionalmente, foram adotados os seguintes critérios para simplificar a abordagem sem comprometer a precisão dos resultados:

- Cada antena transmissora ou receptora é utilizada apenas uma vez em cada enlace;
- Para a avaliação do custo associado à altura, conforme abordado na Seção 3.4.2, sempre foi considerada a posição da antena mais próxima ao obstáculo<sup>6</sup>;
- Todas as antenas, tanto transmissoras quanto receptoras, possuem o mesmo ganho.

É importante ressaltar que esses parâmetros e critérios foram definidos com o objetivo de propor uma rede capaz de suportar uma alta capacidade de transmissão de dados, utilizando uma largura de banda elevada e um ganho suficiente para compensar as perdas de propagação, que tendem a ser mais acentuadas em frequências acima de 5 GHz. Nesse contexto, assegurar uma linha de visada limpa e sem obstruções é fundamental, e sua viabilidade pode ser dimensionada com precisão a partir da análise geográfica apresentada na Seção 3.3.3.

### 3.6 Abordagem dos algoritmos bioinspirados

Para determinar a posição ótima de um par composto por uma antena transmissora e outra receptora – de modo a minimizar interferências e assegurar a qualidade da transmissão do sinal – o problema pode ser considerado relativamente simples, dada a capacidade computacional atual. Por exemplo, no cenário proposto neste trabalho, em que se dispõe 180 antenas transmissoras e 180 receptoras, a análise de um único enlace gera 32.400 soluções possíveis, um número que pode ser avaliado em questão de segundos pelos *softwares* atuais.

Entretanto, à medida que o número de enlaces aumenta, o número de soluções cresce de forma exponencial, elevando significativamente o custo computacional para a avaliação da rede. Esse aumento ocorre porque, além de determinar as melhores combinações, é necessário considerar outros critérios relevantes, como interferência entre enlaces, ruído, escalabilidade

<sup>6</sup> Essa abordagem minimiza os efeitos de difração e garante uma linha de visada mais eficaz, otimizando o desempenho do enlace.

e demais fatores previamente estabelecidos. Conforme apresentado na Seção 3.5, este estudo propõe uma rede composta por cinco enlaces, cuja escolha do arranjo segue as seguintes etapas:

1. Selecionar 5 posições possíveis para as antenas transmissoras dentre as 180 disponíveis;
2. Selecionar 5 posições possíveis para as antenas receptoras dentre as 180 disponíveis;
3. Realizar o pareamento entre as 5 transmissoras e as 5 receptoras.

Para esse pareamento, considerou-se que cada transmissor deve ser pareado com um receptor distinto. Dessa forma, tem-se um problema de pareamento bijetivo entre dois conjuntos de 5 elementos. Para contabilizar o número de maneiras de realizar esse pareamento, alguns pontos devem ser observados:

1. O primeiro transmissor pode ser associado a qualquer um dos 5 receptores;
2. Após essa escolha, o segundo transmissor pode ser associado a qualquer um dos 4 receptores restantes;
3. O terceiro transmissor terá 3 opções, e assim sucessivamente.

Portanto, o número total de pareamentos possíveis é dado pelo produto:

$$5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 5!. \quad (3.8)$$

Para se calcular número total de combinações existentes ( $N$ ) a Equação (3.9) foi aplicada:

$$N = \binom{180}{5} \times \binom{180}{5} \times 5! = \binom{180}{5}^2 \times 5!. \quad (3.9)$$

Para se determinar o valor de  $\binom{180}{5}$ , utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\binom{180}{5} = \frac{180 \times 179 \times 178 \times 177 \times 176}{5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1} = 1\,488\,847\,536 \quad (3.10)$$

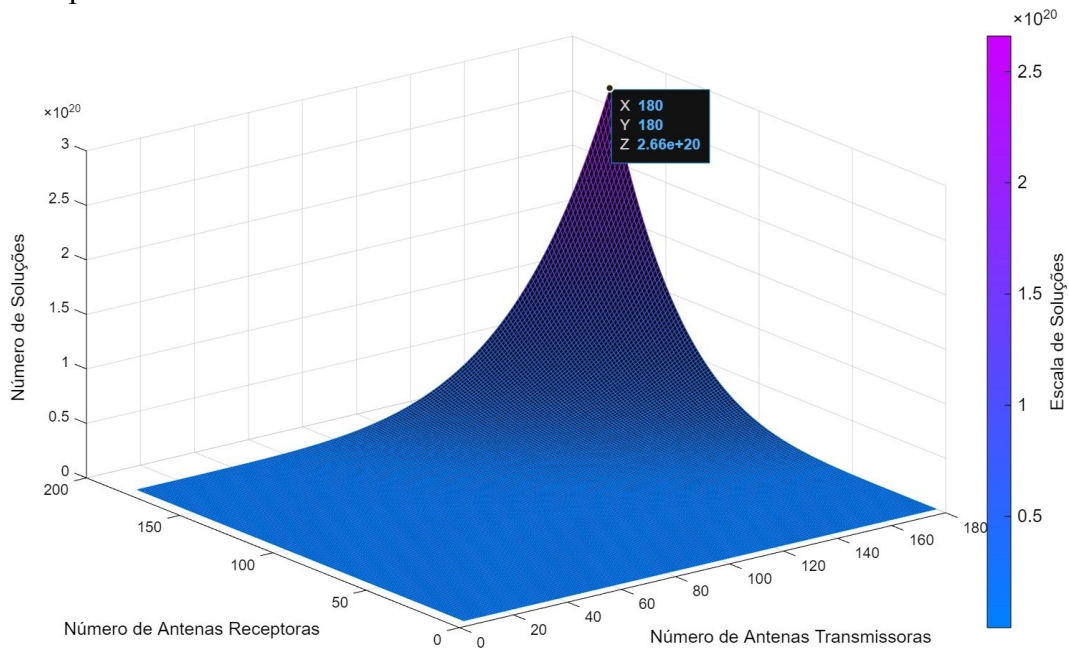
Substituindo esse valor na Equação (3.9), obtém-se:

$$N = (1\,488\,847\,536)^2 \times 120 \approx 2.66 \times 10^{20}. \quad (3.11)$$

Logo, o número total de soluções possíveis para o problema em questão é  $2.66 \times 10^{20}$  – um número totalmente inviável de ser explorado por meio de métodos de força bruta. A Figura 15 ilustra, em forma gráfica, a evolução do número de soluções em função do número de antenas.

Nesse contexto, os algoritmos bioinspirados emergem como ferramentas extraordinárias para a identificação de soluções ótimas em problemas de otimização complexa. De fato, a

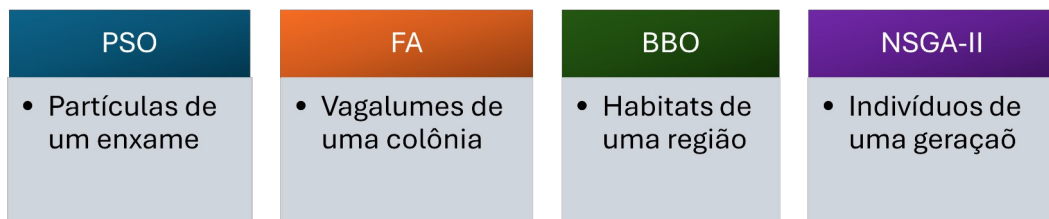
Figura 15 – Número de soluções possíveis em função das antenas transmissoras e receptoras.



Fonte: Próprio autor.

análise exaustiva de todas as soluções possíveis para selecionar a melhor delas é impraticável com os recursos computacionais atualmente disponíveis. Conforme discutido na Seção 2.5, esses algoritmos se inspiram em processos naturais para buscar soluções ótimas de funções complexas. Para o presente trabalho, serão aplicados os algoritmos PSO, FA, BBO e NSGA-II. Em cada um desses métodos, as soluções são representadas por agentes específicos, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Agentes representativos para as soluções candidatas.



Fonte: Próprio autor.

Seguindo essa lógica, considerando que cada agente representa uma solução candidata para o respectivo algoritmo bioinspirado, é possível expressar tais soluções por meio de uma matriz de dimensões  $5 \times 2$ . Em cada linha desta matriz, encontram-se os índices das antenas que compõem um dos enlaces da rede, apresentados na forma  $[T_X, R_Y]$ , onde  $T_X$  denota a antena

transmissora e  $R_Y$  a antena receptora. Para exemplificar essa representação, a Equação (3.12) ilustra um exemplo de solução candidata, na qual os índices das antenas foram atribuídos de forma aleatória.

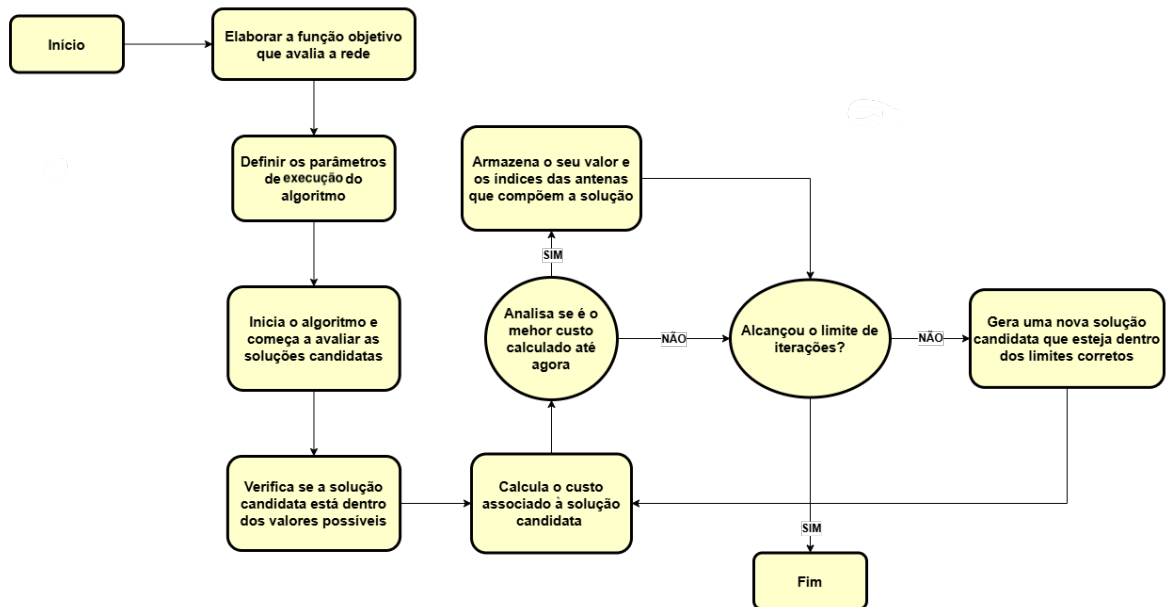
$$\text{Solução candidata} = \begin{bmatrix} T_5 & R_{11} \\ T_{17} & R_8 \\ T_{37} & R_{165} \\ T_{129} & R_{76} \\ T_{81} & R_{32} \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Na Figura 17 é ilustrada a distribuição parcial das antenas transmissoras e receptoras em função das suas coordenadas (latitude e longitude). Para se otimizar a distribuição dessas posições, optou-se por escolhê-las em pequenos blocos. Dessa forma, as áreas que oferecem um terreno mais propício para a instalação de uma antena, consegue ser testada de uma forma mais ampla, já que pequenas variações nas posições podem ser suficiente para evitar certos obstáculos.

Em suma, o processo de otimização por meio dos algoritmos bioinspirados compreende etapas fundamentais, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 18. Conforme definido nas seções anteriores, considerando que o sistema opera com 360 posições possíveis para o conjunto de antenas, é imprescindível que cada solução candidata selecione antenas cujos índices se situem dentro dos intervalos estabelecidos (de 1 a 180 para cada tipo de antena). Essa restrição não apenas assegura a consistência dos resultados, mas também permite a eliminação de erros potenciais. Por exemplo, se for gerada uma solução que atribua a um enlace um índice para uma antena inexistente, o código encontrará problemas ao tentar acessar os dados geográficos armazenados nas matrizes do Matlab, conforme demonstrado na Seção 3.3.4.



Figura 18 – Fluxograma de execução geral dos algoritmos bioinspirados.



Fonte: Próprio autor.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a execução dos algoritmos bioinspirados, os quais foram comparados com uma técnica de seleção randômica. Adicionalmente, foi realizada a parametrização de todos os algoritmos, visando assegurar uma execução igualitária e satisfatória entre as abordagens.

### 4.1 Abordagem Randômica

Para possibilitar a comparação dos resultados com os algoritmos bioinspirados, desenvolveu-se uma técnica de seleção randômica para definir as posições das antenas. Nesta abordagem, pressupõe-se que o projetista escolhe as posições das antenas de maneira aleatória, obedecendo ao limite do número disponível para seleção (1 a 180 para cada classe). Assim, após definir aleatoriamente um conjunto de 5 enlaces, calcula-se o custo associado a essa configuração. Esse processo é repetido diversas vezes até que se atinja um número pré-estabelecido de execuções, permitindo a obtenção de uma avaliação estatística robusta dos custos.

### 4.2 Parametrização dos Algoritmos

Para avaliar a influência dos parâmetros dos algoritmos bioinspirados na minimização do custo dos enlaces, foi adotada a técnica de varredura de parâmetros<sup>1</sup>. Nesse processo, um dos parâmetros é ajustado enquanto os demais permanecem fixos. Após determinar o melhor valor para o parâmetro analisado, ele é mantido constante, e o procedimento é repetido para os demais parâmetros. Esse método permite uma calibração mais eficiente, garantindo que a configuração final seja a mais adequada para o problema em questão (AGUIAR, 2022).

Além da varredura de parâmetros, também foi empregado o método de Monte Carlo (MC), com o objetivo de analisar a estabilidade dos resultados. Dado que a natureza estocástica desses algoritmos pode gerar soluções distintas a cada iteração, o uso do MC possibilita a obtenção de uma estimativa estatisticamente robusta do custo médio dos enlaces, juntamente com a determinação de um intervalo de confiança (IC) associado às simulações.

Durante os testes preliminares, verificou-se que a utilização de menos de 100 repetições do MC resultava em intervalos de confiança excessivamente amplos, comprometendo a

<sup>1</sup> Método no qual um parâmetro é variado enquanto os demais são mantidos constantes, permitindo a análise de seu impacto no desempenho do algoritmo.

precisão das estimativas. Para mitigar esse problema, o número de repetições foi aumentado para 250, o que resultou em intervalos de confiança excessivamente estreitos e um tempo de execução acentuado. Para equilibrar a relação entre qualidade dos resultados e tempo de execução, foi adotado o padrão de 150 repetições de MC para teste de parametrização. Adicionalmente, foi adotado um intervalo de confiança de 95% assegurando maior confiabilidade na análise dos resultados obtidos.

#### 4.2.1 PSO

Para a implementação do algoritmo PSO descrito na Seção 2.5.1.1, é imprescindível definir os parâmetros que orientam seu funcionamento. Entre esses, destacam-se o tamanho da população de partículas ( $NumPop$ ), o fator cognitivo ( $c_1$ ), o fator social ( $c_2$ ), o coeficiente de inércia ( $w$ ), o coeficiente de amortecimento ( $w_{Amor}$ ) e número de iterações ( $NumIt_{PSO}$ ). Com base nos fundamentos propostos em (EBERHART; KENNEDY, 1995), os papéis de cada parâmetro no algoritmo PSO são os seguintes:

- $NumPop$  : determina o número de partículas que exploram o espaço de soluções. Uma população maior pode ampliar a diversidade e, conseqüentemente, aumentar a chance de encontrar soluções de alta qualidade, embora isso também acarrete em maior custo computacional;
- $c_1$  : representa a influência da experiência individual de cada partícula, incentivando-a a mover-se em direção à melhor posição que ela própria já encontrou;
- $c_2$  : reflete a influência coletiva do grupo, impulsionando as partículas a se direcionarem para a melhor posição encontrada pelo enxame;
- $w$  : controla a tendência de cada partícula manter sua trajetória atual, promovendo a exploração do espaço de soluções;
- $w_{Amor}$  : regula a diminuição gradual da inércia ao longo das iterações, contribuindo para a convergência do algoritmo;
- $NumIt_{PSO}$  : define o total de ciclos de atualização das partículas, influenciando diretamente o tempo de execução e a precisão da convergência.

##### 4.2.1.1 População de partículas

Inicialmente foi executada a varredura dos valores para o tamanho da população, considerando as quantidades 100, 500, 1000 e 5000 partículas. Os demais parâmetros foram

fixados conforme descrito a seguir:

- Fator cognitivo ( $c_1$ ) = 1.5;
- Fator social ( $c_2$ ) = 1.5;
- Coeficiente de inércia ( $w$ ) = 0.8;
- Coeficiente de amortecimento ( $w_{\text{Amor}}$ ) = 0.97;
- Número de iterações ( $\text{NumIt}_{\text{PSO}}$ ) = 1000.

Durante os testes preliminares, constatou-se que a utilização de repetições de MC superiores a 200 implicava um custo computacional excessivamente elevado<sup>2</sup>. Por exemplo, no primeiro experimento, foram aplicadas 250 repetições de MC para avaliar o desempenho dos quatro valores distintos de  $\text{NumPop}$ , resultando em um tempo total de execução de 202.221,10 segundos, ou aproximadamente 56 horas e 10 minutos. Ademais, para esse número de repetições, observou-se um intervalo de confiança demasiadamente estreito, o que poderia limitar a comparação entre o desempenho dos diferentes parâmetros.

Em seguida, testou-se o valor de 150 repetições de MC. Embora essa redução tenha contribuído para a diminuição do custo computacional, o intervalo de confiança continuou excessivamente estreito. Diante desse cenário, optou-se, nesta etapa de parametrização, por adotar um valor padrão de 50 repetições de MC para todos os algoritmos, visto que essa configuração demonstrou o melhor equilíbrio entre o custo computacional e a amplitude do intervalo de confiança. Os resultados comparativos de tempo para essa etapa inicial estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de execução para diferentes valores de MC.

$\text{NumPop}$	250 MC	150 MC	50 MC
100	3.247,47 s	1.786,06 s	747,15 s
500	14.593,97 s	8.638,14 s	6.712,07 s
1000	29.323,24 s	17.182,41 s	13.708,27 s
5000	155.056,42 s	93.598,04 s	47.117,04 s
Tempo total (s)	202.221,10 s	121.204,65 s	68.284,53 s
Tempo total (h)	56,17 h	33,67 h	18,97 h

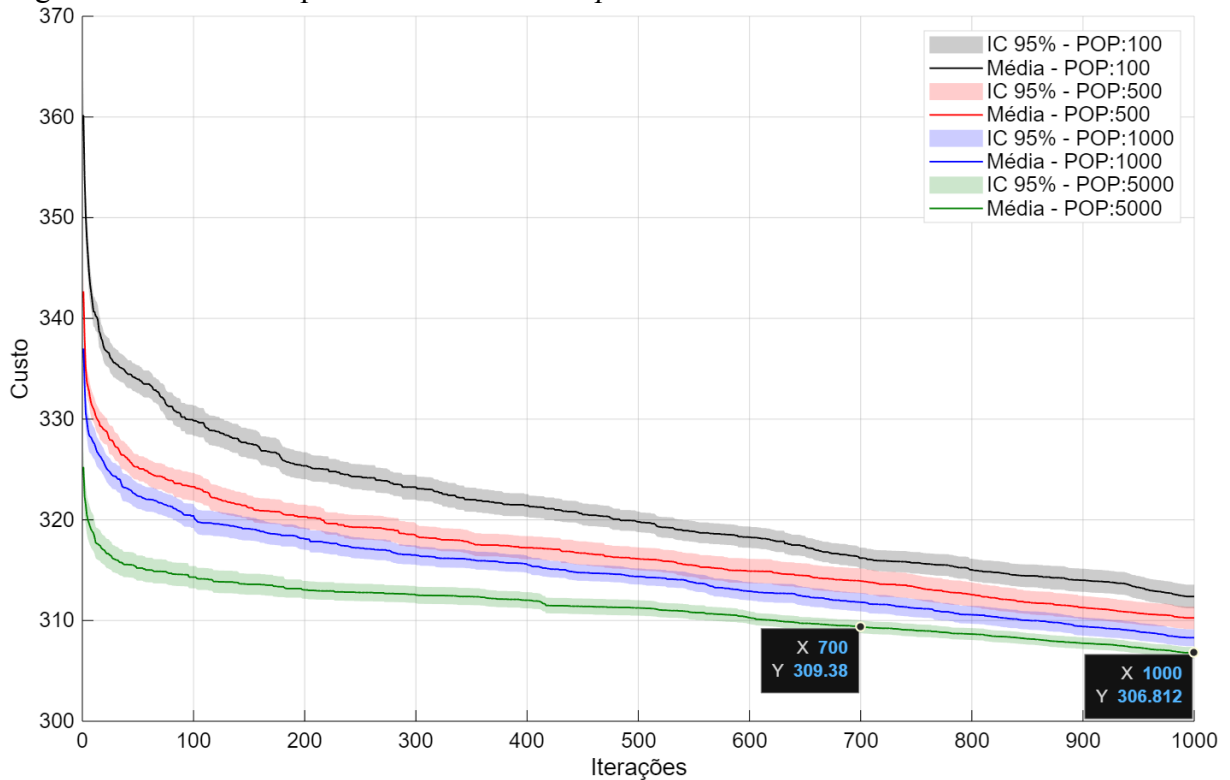
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 19, são apresentados os resultados referentes aos diferentes valores de  $\text{NumPop}$ , onde o eixo horizontal representa o número de iterações e o eixo vertical, o custo das soluções. A análise da figura revela que, a partir da iteração 700, a variação no valor do custo

<sup>2</sup> As simulações foram realizadas em um computador com as seguintes configurações: processador Intel Core i7-12700K, 16 GB de RAM, SSD de 500 GB e placa de vídeo NVIDIA RTX 3060 de 12 GB.

total torna-se mínima. Além disso, observou-se que, para os valores de  $NumPop$  igual a 1000 e 5000, os intervalos de confiança praticamente se sobrepõem a partir desse ponto. Assim, visando otimizar a relação entre o custo computacional e a qualidade dos resultados, foram estabelecidos os valores de  $NumPop = 900$  e  $NumIt_{PSO} = 700$ .

Figura 19 – Varredura para valores de  $NumPop$ .



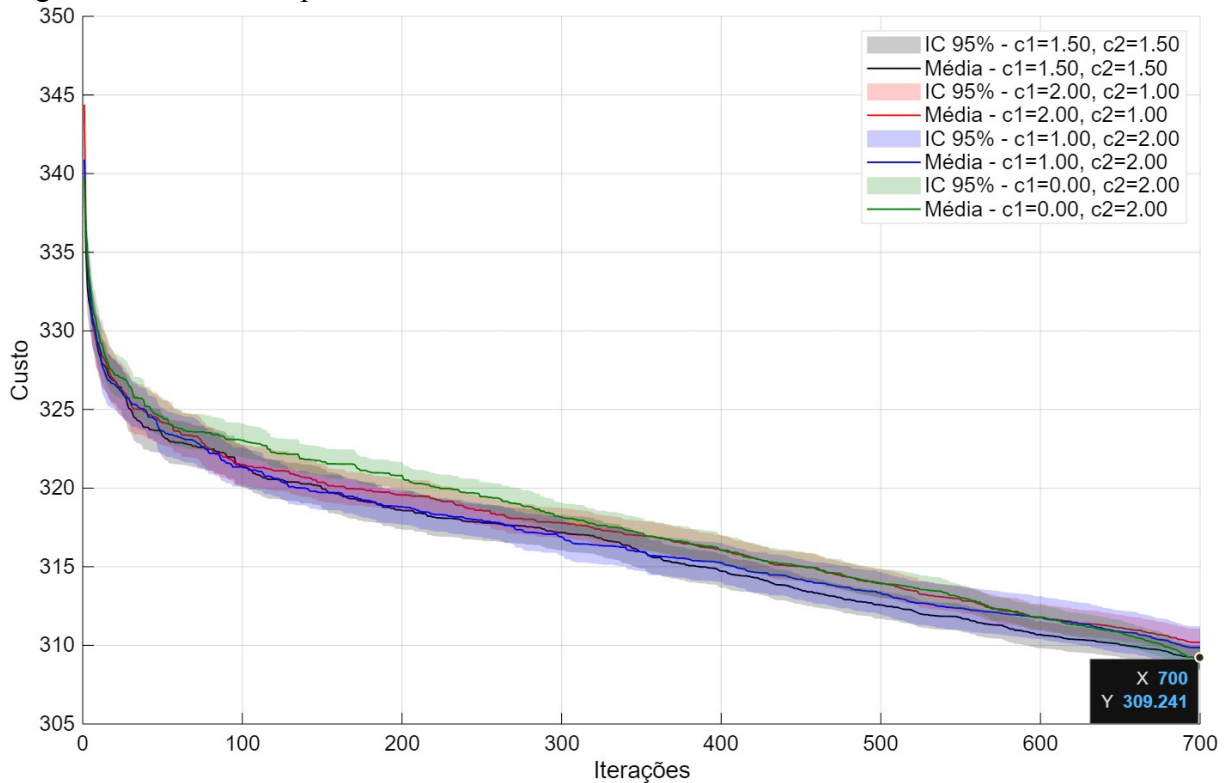
Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.1.2 Fator cognitivo e fator social

Os próximos parâmetros a serem avaliados foram  $c_1$  (fator cognitivo) e  $c_2$  (fator social). Devido à natureza interdependente desses parâmetros, optou-se por testar pares de valores para analisar com maior precisão a relação entre eles. Foram escolhidas as seguintes combinações: 1,5 e 1,5; 2 e 1; 1 e 2; 0 e 2. A Figura 20 apresenta os resultados obtidos para cada uma dessas configurações.

Observou-se que os intervalos de confiança se sobrepõem consideravelmente para todas as combinações testadas. Contudo, a configuração em que  $c_1$  e  $c_2$  são iguais evidenciou um desempenho ligeiramente superior, comportamento este previsto em estudos anteriores (SERANI *et al.*, 2016). Assim, optou-se por adotar os valores  $c_1 = 1,5$  e  $c_2 = 1,5$ .

Figura 20 – Varredura para valores de  $c_1$  e  $c_2$ .



Fonte: Próprio autor.

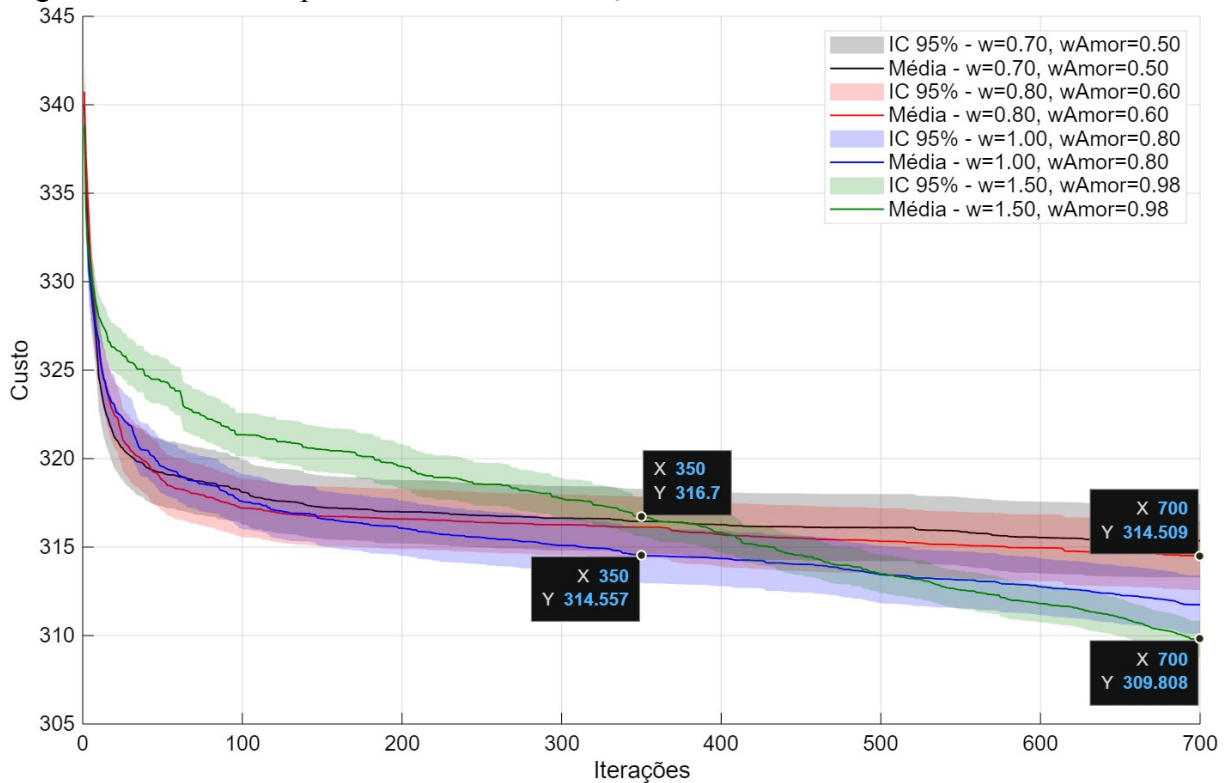
#### 4.2.1.3 Inércia e amortecimento

Por fim, foram realizados testes para determinar os valores adequados dos coeficientes de inércia ( $w$ ) e amortecimento ( $w_{Amor}$ ). Neste procedimento, adotou-se a mesma abordagem descrita na Seção 4.2.1.2, avaliando-se conjuntos de dois valores simultaneamente. As combinações testadas foram: 0,7 e 0,5; 0,8 e 0,6; 1,0 e 0,8; e 1,5 e 0,98.

Na Figura 21 são apresentados os resultados obtidos para essas variações, a partir dos quais podem ser extraídas conclusões significativas. Inicialmente, observou-se que, para valores elevados de  $w$ , as partículas tendem a explorar o espaço de busca de forma mais contida durante as primeiras iterações, resultando em soluções de qualidade inferior. No entanto, ao atingir aproximadamente a metade das iterações, essa tendência se inverte, estimulando a busca por soluções ótimas e levando a custos significativamente menores em comparação com cenários que utilizam valores reduzidos de  $w$ .

Adicionalmente, os resultados indicaram que valores maiores de  $w_{Amor}$  – desde que inferiores ao valor de  $w$  – promovem uma diminuição contínua na curva de custos, mesmo após a metade das iterações. Com base nessas curvas, optou-se por adotar os valores  $w = 1,5$  e  $w_{Amor} = 0,98$ , os quais proporcionaram um melhor equilíbrio entre exploração do espaço de soluções e

Figura 21 – Varredura para valores de  $w$  e  $w_{Amor}$ .



Fonte: Próprio autor.

convergência para soluções de alta qualidade.

Na Tabela são apresentados os tempos de execução para a varredura de todos os parâmetros apresentação na Seção 4.2.1.

#### 4.2.2 FA

Para a implementação do algoritmo FA, conforme apresentado na Seção 2.5.1.2, serão considerados os seguintes parâmetros: a quantidade de vaga-lumes no enxame ( $PopVag$ ); o coeficiente de absorção de luz ( $\mu$ ); o valor base do coeficiente de atração ( $\beta_0$ ); o coeficiente de mutação inicial ( $\alpha_0$ ); o coeficiente de amortecimento ( $\alpha_{Amor}$ ); parâmetro de escala ( $m$ ); e o número total de iterações ( $NumIt_{FA}$ ). A seguir, o papel de cada um desses parâmetros é descrito brevemente.

- $PopVag$ : representa o número total de vaga-lumes que compõem o enxame, fundamental para garantir a diversidade na exploração do espaço de soluções;
- $\mu$ : denota o coeficiente de absorção de luz, o qual determina a taxa de decaimento da intensidade luminosa com o aumento da distância entre os vaga-lumes;
- $\beta_0$ : corresponde ao valor base do coeficiente de atração, responsável por regular a atrativi-

dade inicial entre os vaga-lumes, incentivando o deslocamento em direção aos indivíduos com maior intensidade luminosa;

- $\alpha_0$ : trata-se do coeficiente de mutação inicial, que introduz variações aleatórias nas posições dos vaga-lumes, sendo essencial para promover a exploração global do espaço de soluções;
- $\alpha_{\text{Amor}}$ : indica o coeficiente de amortecimento aplicado à mutação, o qual reduz gradualmente a magnitude das perturbações ao longo das iterações;
- $m$ : parâmetro de escala que ajusta a influência relativa dos demais parâmetros no comportamento global do algoritmo;
- $\text{NumIt}_{\text{FA}}$ : representa o número total de iterações que o algoritmo realizará.

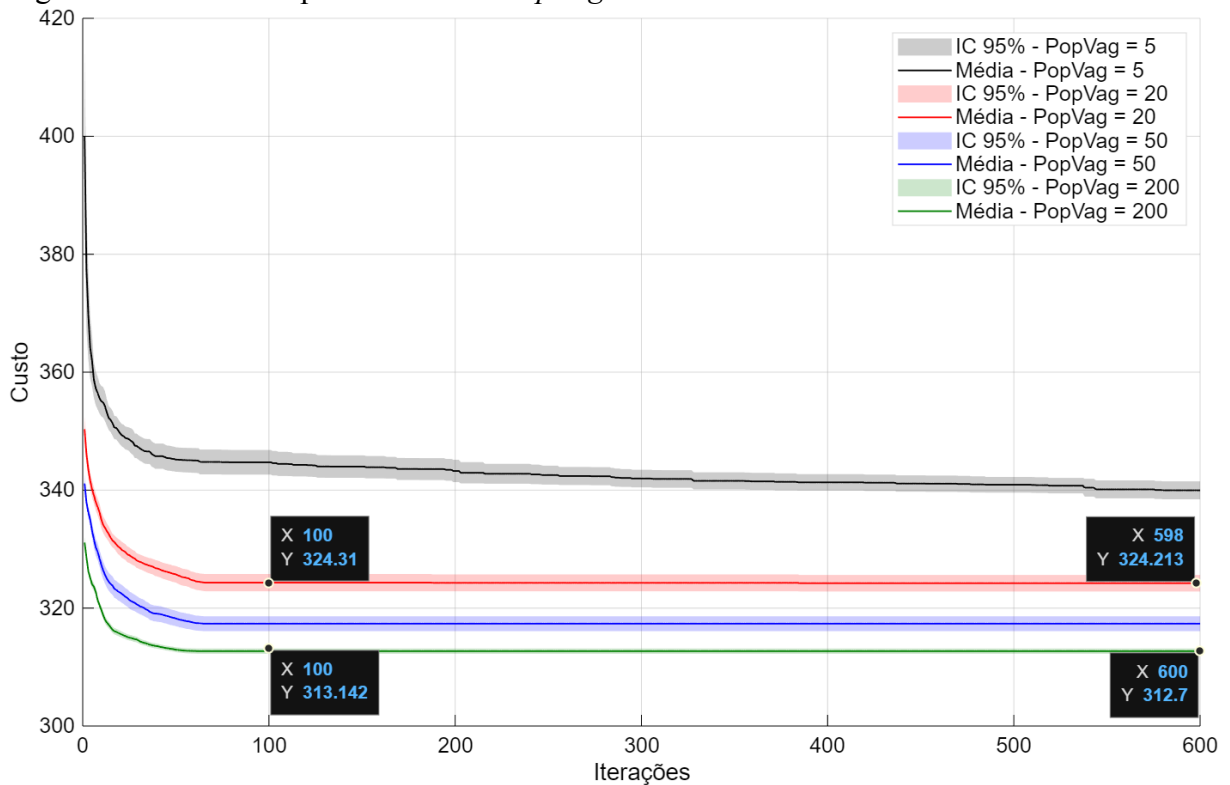
#### 4.2.2.1 População de vaga-lumes

A primeira etapa da parametrização do algoritmo FA teve como objetivo determinar o valor ideal da população de vaga-lumes ( $\text{PopVag}$ ) para o problema em análise. Foram testados os valores 5, 20, 50 e 200, enquanto os demais parâmetros permaneceram fixos, conforme segue:

- Coeficiente de absorção de luz ( $\gamma$ ) = 1;
- Coeficiente de atração ( $\beta_0$ ) = 2;
- Coeficiente de mutação inicial ( $\alpha_0$ ) = 0.2;
- Coeficiente de amortecimento ( $\alpha_{\text{Amor}}$ ) = 0.98;
- Parâmetro de escala ( $m$ ) = 2.
- Número de iterações ( $\text{NumIt}_{\text{FA}}$ ) = 600.

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos para a variação de  $\text{PopVag}$ . Observou-se inicialmente que, quanto maior o valor da população de vaga-lumes, melhores eram as soluções encontradas, conforme indicado pela não sobreposição dos intervalos de confiança. No entanto, constatou-se uma diferença crítica no tempo de execução para o maior valor testado (200), que atingiu 31,42 horas, além de apresentar um intervalo de confiança relativamente estreito. Esse resultado evidencia que, apesar de proporcionar soluções de alta qualidade, o uso de um valor elevado de  $\text{PopVag}$  acarreta um custo computacional significativo.

Adicionalmente, a análise das curvas demonstrou que, a partir da iteração 100, os valores de custo se estabilizavam, sugerindo uma convergência prematura para soluções ótimas. Com base nesses achados, optou-se por adotar os valores  $\text{PopVag} = 80$  e  $\text{NumIt}_{\text{FA}} = 300$  para a configuração final, estabelecendo um equilíbrio adequado entre a qualidade das soluções e o

Figura 22 – Varredura para valores de *PopVag*.

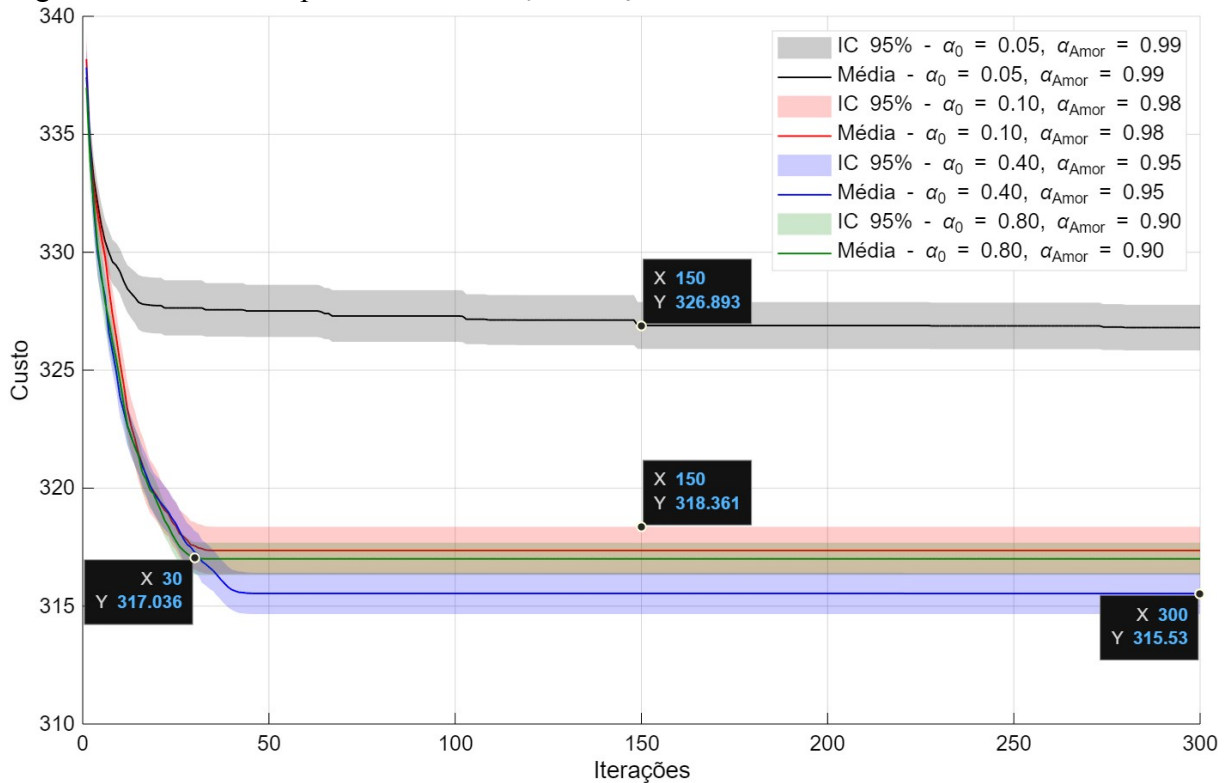
Fonte: Próprio autor.

custo computacional.

#### 4.2.2.2 Coeficiente de mutação inicial e amortecimento

Em sequência, foram avaliados os parâmetros de coeficiente de mutação inicial ( $\alpha_0$ ) e de amortecimento ( $\alpha_{\text{Amor}}$ ) a fim de compreender a relação entre ambos e seu impacto nos resultados obtidos pelo algoritmo FA. Para facilitar a análise, foram testados quatro pares de valores, respectivamente: 0,05 e 0,99; 0,10 e 0,98; 0,40 e 0,95; e 0,80 e 0,90. Conforme ilustrado na Figura 23, a primeira combinação apresentou um desempenho claramente inferior, evidenciado pelo elevado custo médio. Por outro lado, as demais combinações demonstraram uma sobreposição dos intervalos de confiança já nas primeiras iterações, com as configurações intermediárias produzindo soluções de melhor qualidade. Esses resultados indicam que uma alta variação aleatória na posição dos vaga-lumes não garante, por si só, a obtenção de soluções superiores. Assim, optou-se por fixar os valores de  $\alpha_0 = 0,4$  e  $\alpha_{\text{Amor}} = 0,95$ .

Figura 23 – Varredura para valores de  $\alpha_0$  e  $\alpha_{Amor}$ .



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.2.3 Coeficiente de absorção de luz e atração

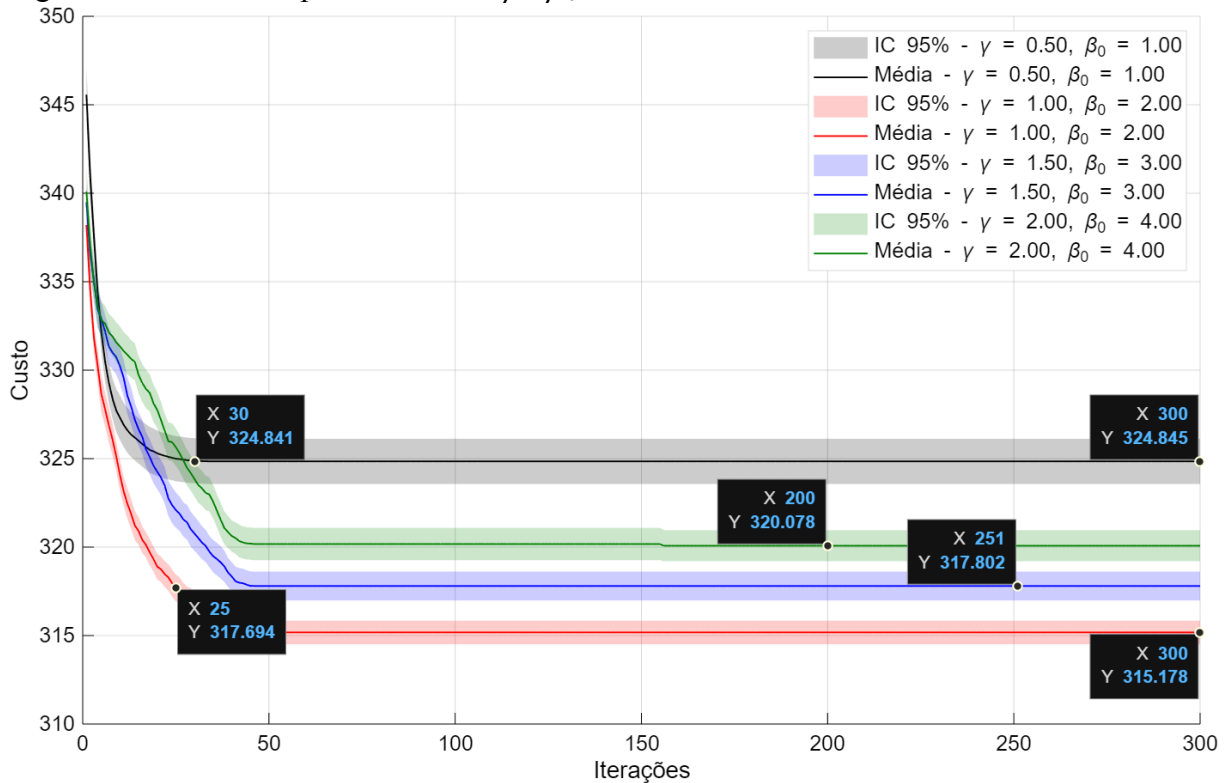
Por fim, os últimos parâmetros a serem avaliados para o algoritmo FA foram o coeficiente de absorção de luz ( $\mu$ ) e o coeficiente de atração entre os vaga-lumes ( $\beta_0$ ). De maneira análoga à abordagem descrita na Seção 4.2.2.2, foram testados pares de valores para esses parâmetros, utilizando as seguintes combinações: 0,5 e 1; 1 e 2; 1,5 e 3; e 2 e 4.

Conforme ilustrado na Figura 24, observa-se que as combinações com valores elevados não apresentaram desempenho satisfatório, enquanto os valores muito baixos também não foram os mais adequados. Em contraste, a combinação intermediária demonstrou a melhor qualidade de soluções. Dessa forma, optou-se por fixar os valores de  $\mu$  em 1 e  $\beta_0$  em 2.

#### 4.2.3 BBO

O algoritmo BBO, conforme explicado na Seção 2.5.2.3, requer a definição de diversos parâmetros para sua implementação adequada. Entre eles, destacam-se: a quantidade de habitats ( $NumHabitat$ ); a taxa de preservação dos habitats ( $TaxaPreservacao$ ); a probabilidade de mutação ( $FatorMut$ ); a intensidade de mutação ( $\sigma_{Mut}$ ); e número de iterações ( $NumIt_{BBO}$ ). A seguir, é apresentada uma breve descrição do papel de cada um desses parâmetros no funcio-

Figura 24 – Varredura para valores de  $\gamma$  e  $\beta_0$ .



Fonte: Próprio autor.

namento do algoritmo:

- *NumHabitat* : representa o número total de habitats, os quais correspondem a possíveis soluções no espaço de busca;
- *TaxaPreservacao* : indica a fração de habitats que será preservada em cada iteração, impedindo que todos os habitats passem por alterações;
- *FatorMut* : define a probabilidade de ocorrência de mutações nos habitats, sendo fundamental para a introdução de variabilidade, permitindo que o algoritmo explore novas regiões do espaço de soluções e evite a convergência prematura;
- $\sigma_{Mut}$ : quantifica a intensidade ou magnitude das mutações que ocorrem nos habitats;
- *NumIt*<sub>BBO</sub>: representa o número total de iterações que o algoritmo realizará.

#### 4.2.3.1 Quantidade de habitats

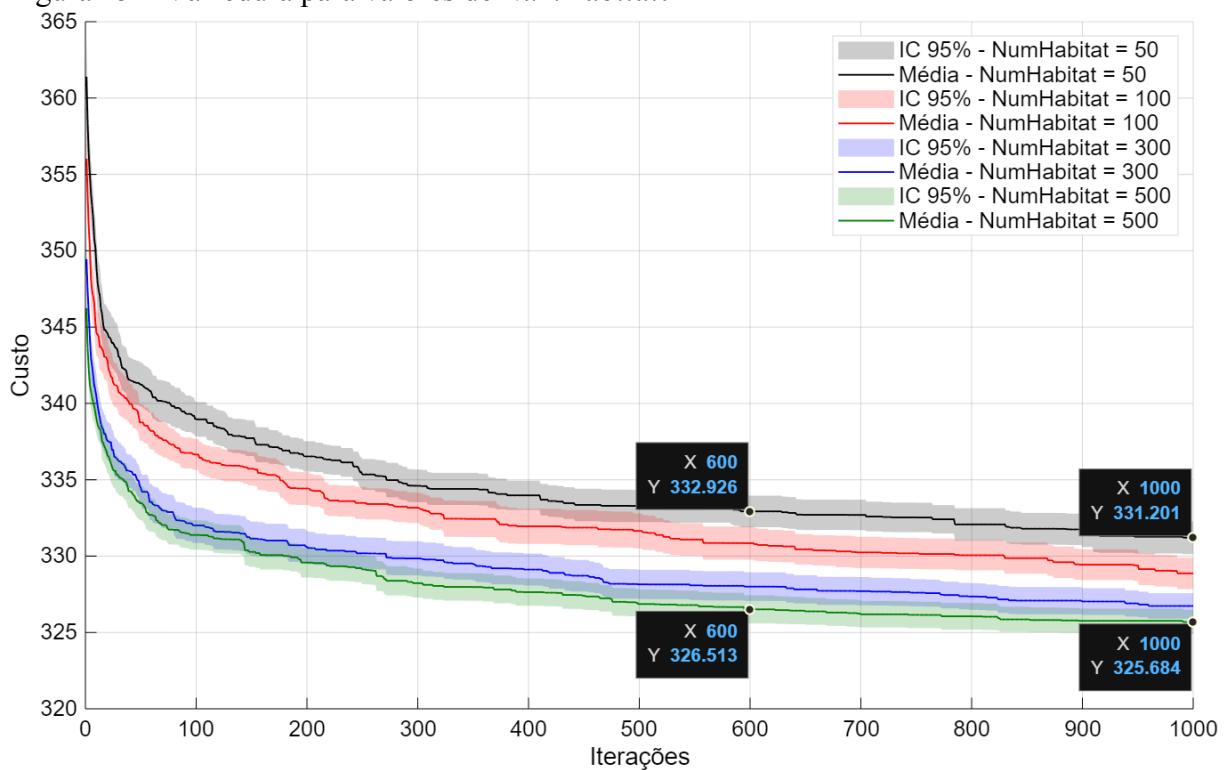
Inicialmente, foi realizada uma simulação para determinar o valor ideal do parâmetro *NumHabitat* para o algoritmo BBO. Nesta etapa, foram simulados os valores 50, 100, 300 e 500, mantendo os demais parâmetros fixos da seguinte forma:

- Taxa de preservação dos habitats (*TaxaPreservacao*) = 0,2;

- Probabilidade de mutação ( $FatorMut$ ) = 0,1;
- Intensidade de mutação ( $\sigma_{Mut}$ ) = 0,02;
- Número de iterações ( $NumIt_{BBO}$ ) = 1000.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para essa primeira etapa de varredura. Para os valores de 50 e 100 habitats, não foi observada sobreposição dos intervalos de confiança, sugerindo uma diferenciação clara entre as soluções geradas. Em contraste, para os valores de 300 e 500, os intervalos de confiança se sobrepuseram desde o início, evidenciando que o aumento excessivo no número de habitats não implica, necessariamente, em melhorias significativas na qualidade das soluções.

Figura 25 – Varredura para valores de  $NumHabitat$ .



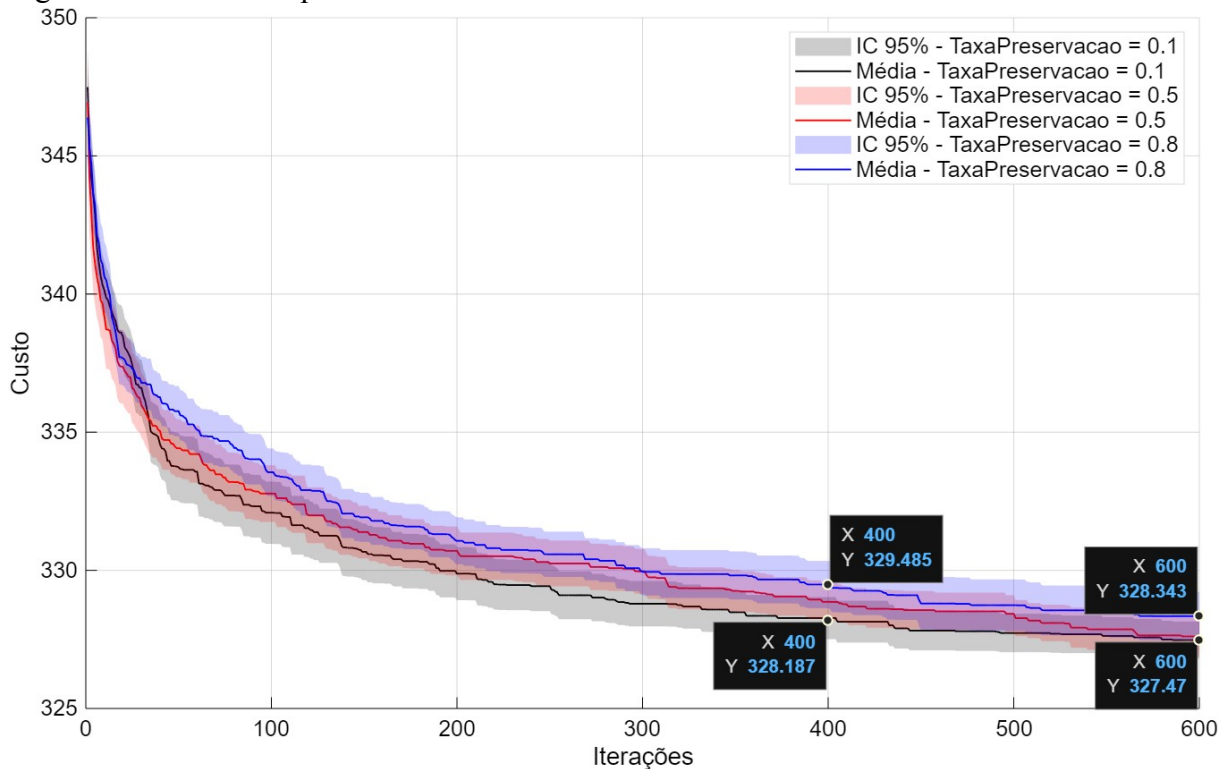
Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, verificou-se que, a partir da iteração 600, os valores de custo estabilizaram, indicando uma convergência levemente prematura das curvas. Diante desses resultados, optou-se por fixar os valores de  $NumHabitat = 400$  e  $NumIt_{BBO} = 600$ , a fim de se obter um equilíbrio satisfatório entre a qualidade das soluções e o custo computacional.

#### 4.2.3.2 Taxa de preservação

Em seguida foi realizada a parametrização do parâmetro *TaxaPreservacao* do BBO. Para essa etapa, foram avaliados três valores distintos: 0,1; 0,5 e 0,8. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 26. A análise inicial revela que o valor de 0,8 apresentou desempenho inferior em relação aos demais, mesmo quando os intervalos de confiança se sobrepuseram, especialmente a partir da iteração 400, evidenciando que a curva média associada a esse valor ficou aquém das outras. Esse comportamento sugere que, quanto maior a taxa de preservação, menor a diversidade nas soluções geradas, o que tende a resultar em soluções de qualidade inferior.

Figura 26 – Varredura para valores de *TaxaPreservacao*.



Fonte: Próprio autor.

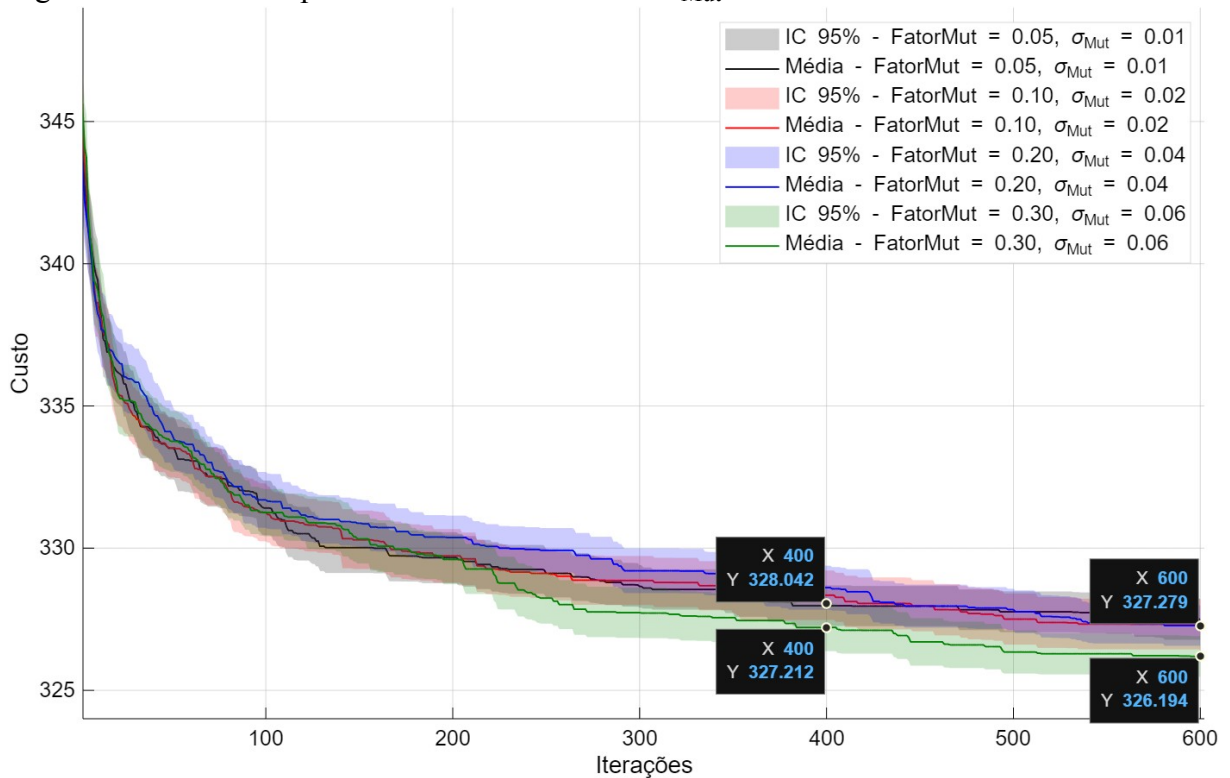
Ademais, observou-se que o desempenho para o valor de 0,1 foi superior durante a maior parte das iterações, embora tenha convergido para um desempenho semelhante ao valor de 0,5 nas últimas iterações. Em vista desses resultados, optou-se por fixar o valor de *TaxaPreservacao* em 0,2, a fim de promover um equilíbrio adequado entre diversidade e qualidade das soluções.

#### 4.2.3.3 Probabilidade e intensidade de mutação

Os parâmetros finais avaliados foram a probabilidade de mutação ( $FatorMut$ ) e a intensidade de mutação ( $\sigma_{Mut}$ ). Para analisar o impacto desses parâmetros na execução do algoritmo BBO, foram testados quatro conjuntos de valores, conforme segue: 0,05 e 0,01; 0,10 e 0,02; 0,20 e 0,04; e 0,30 e 0,06, respectivamente.

Conforme ilustrado na Figura 27, não foram observadas diferenças acentuadas entre os valores médios de custo para as diferentes combinações. Entretanto, verificou-se um leve favorecimento para a última combinação, especialmente a partir da iteração 400. Em vista desses resultados, optou-se por fixar o valor de  $FatorMut$  em 0,30 e  $\sigma_{Mut}$  em 0,06.

Figura 27 – Varredura para valores de  $FatorMut$  e  $\sigma_{Mut}$ .



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.4 NSGA-II

O algoritmo NSGA-II, além dos mecanismos de Ordenação Não-Dominada e *Crowding Distance* detalhados na Seção 2.5.2.2, depende de alguns parâmetros essenciais para sua implementação. Tais parâmetros são: o número de indivíduos na população ( $NumInd$ ); o percentual de cruzamento ( $PerCruz$ ); o percentual de mutação ( $PerMut$ ); a taxa de mutação ( $Mu$ ); e o

número de iterações ( $NumIt_{NSGA-II}$ ). Em suma, o papel de cada um desses parâmetros pode ser descrito da seguinte forma:

- $NumInd$  : define o número total de indivíduos que compõem a população, influenciando a diversidade das soluções e a robustez do processo evolutivo;
- $PerCruz$  : representa o percentual de indivíduos selecionados para o cruzamento, determinando a proporção de recombinações realizadas a cada iteração;
- $PerMut$  : indica o percentual de indivíduos que sofrerão mutação, contribuindo para a introdução de variabilidade no conjunto de soluções;
- $Mu$  : é a taxa de mutação, ou seja, a probabilidade de ocorrência de alterações genéticas em cada indivíduo;
- $NumIt_{NSGA-II}$ : corresponde ao número total de iterações realizadas pelo algoritmo.

#### 4.2.4.1 Número de indivíduos

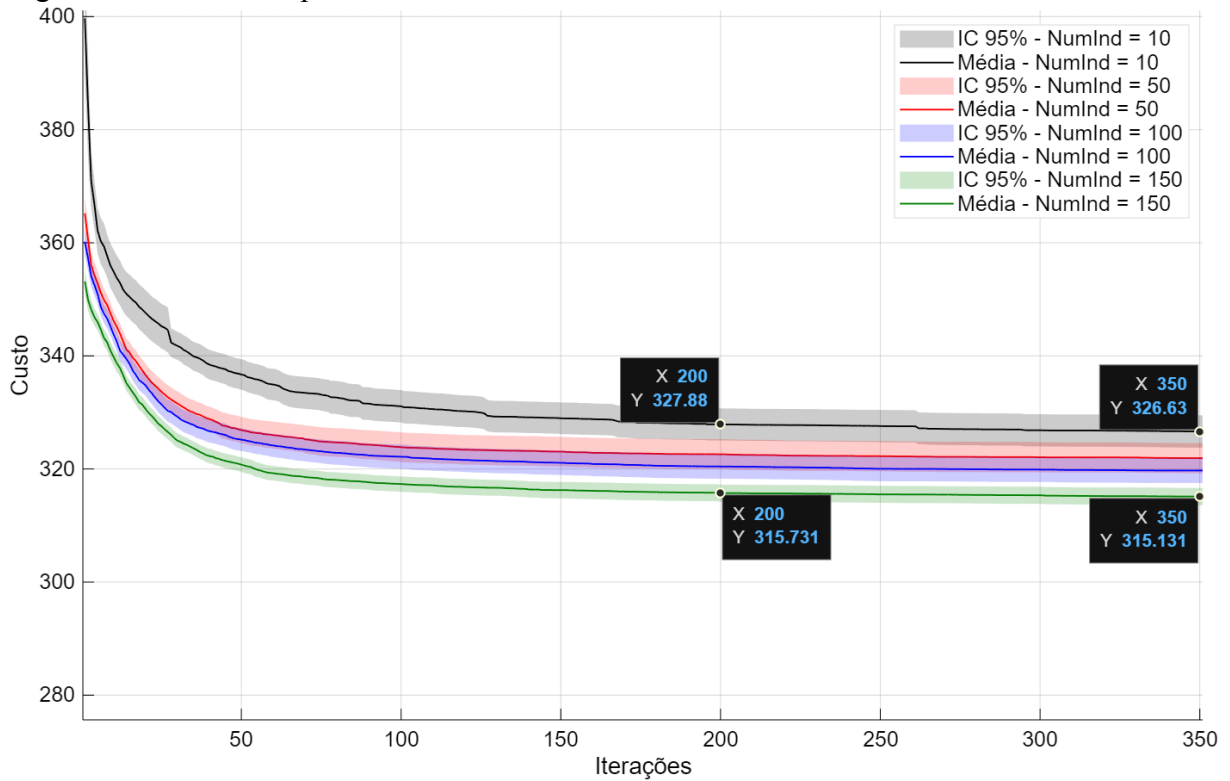
Para iniciar a parametrização do NSGA-II, foram inicialmente avaliados quatro valores distintos para o parâmetro  $NumInd$  (número de indivíduos): 10, 50, 100 e 150. Já os demais parâmetros permaneceram fixos nos seguintes valores:

- Percentual de cruzamento ( $PerCruz$ ) = 0,7;
- Percentual de mutação ( $PerMut$ ) = 0,4;
- Taxa de mutação ( $Mu$ ) = 0,02;
- Número de iterações ( $NumIt_{NSGA-II}$ ) = 1000;

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos na primeira etapa da parametrização. Para facilitar a visualização, o gráfico exibe os dados até a iteração 300, pois a partir desse ponto não foram observadas variações significativas nos valores de custo em função do  $NumInd$ .

Inicialmente observou-se que, após a iteração 100, os intervalos de confiança dos três menores valores de  $NumInd$  começaram a se sobrepor, enquanto o valor mais elevado (150) apresentou um desempenho superior em termos de custo. Contudo, apesar do melhor desempenho associado a  $NumInd = 150$ , houve um aumento considerável no custo computacional. Por exemplo, o tempo total de execução foi de 5,46 horas para  $NumInd = 100$ ; já para  $NumInd = 150$  — um acréscimo de 50% — o tempo saltou para 11,92 horas, mais que o dobro do tempo anterior.

Dessa forma, para manter um equilíbrio adequado entre a qualidade das soluções e o custo computacional, optou-se por fixar  $NumInd$  em 120 e reduzir o número de iterações para

Figura 28 – Varredura para valores de *NumInd*.

Fonte: Próprio autor.

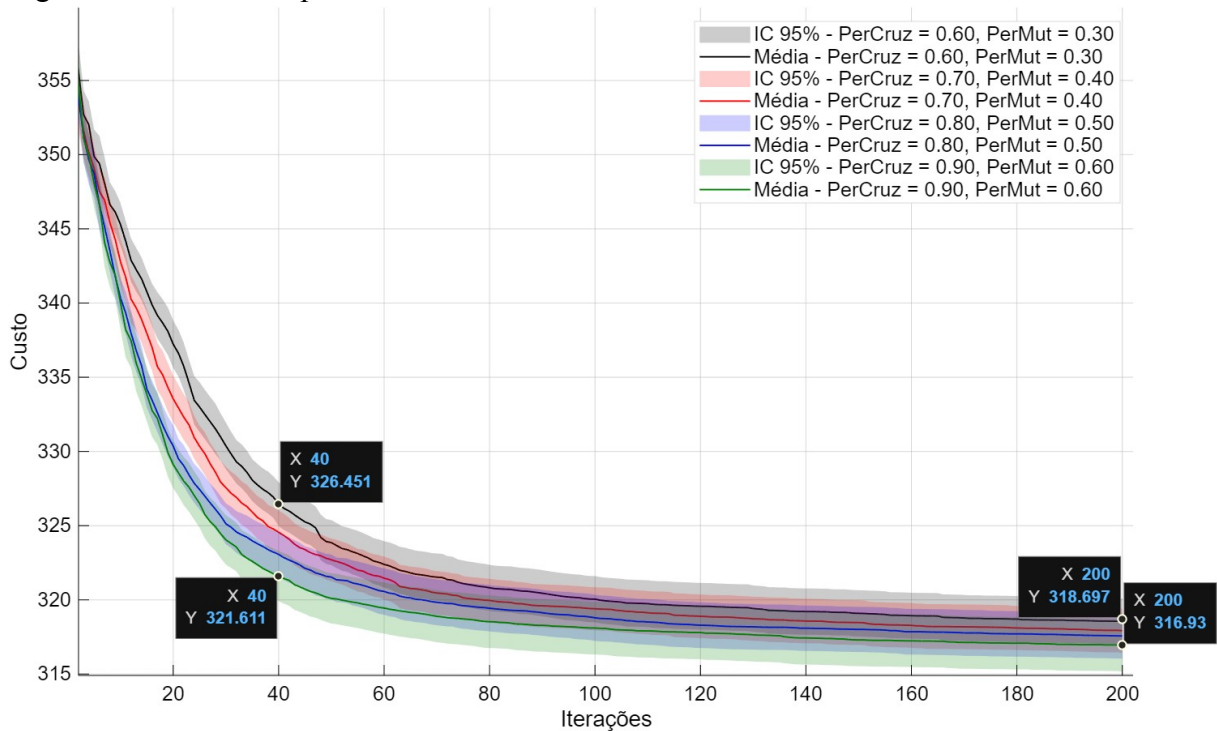
$NumIt_{NSGA-II} = 200$ .

#### 4.2.4.2 Percentual de cruzamento e percentual de mutação

Posteriormente, foram realizadas simulações para definir os valores dos parâmetros de percentual de cruzamento (*PerCruz*) e percentual de mutação (*PerMut*). Considerando a interdependência desses parâmetros, optou-se por testar combinações preestabelecidas, constituídas por quatro pares de valores, respectivamente: (0,6 e 0,3); (0,7 e 0,4); (0,8 e 0,5); e (0,9 e 0,6).

Conforme ilustrado na Figura 29, as diferenças nos valores de custo entre as diversas combinações não se mostraram expressivas, sobretudo nas iterações finais, onde os intervalos de confiança começaram a se sobrepor a partir da iteração 40. Entretanto, a análise da curva média de custo indicou que a combinação com os valores mais elevados proporcionou o resultado final mais favorável em comparação com as demais. Em vista disso, optou-se por fixar *PerCruz* em 0,9 e *PerMut* em 0,6.

Figura 29 – Varredura para valores de *PerCruz* e *PerMut*.



Fonte: Próprio autor.

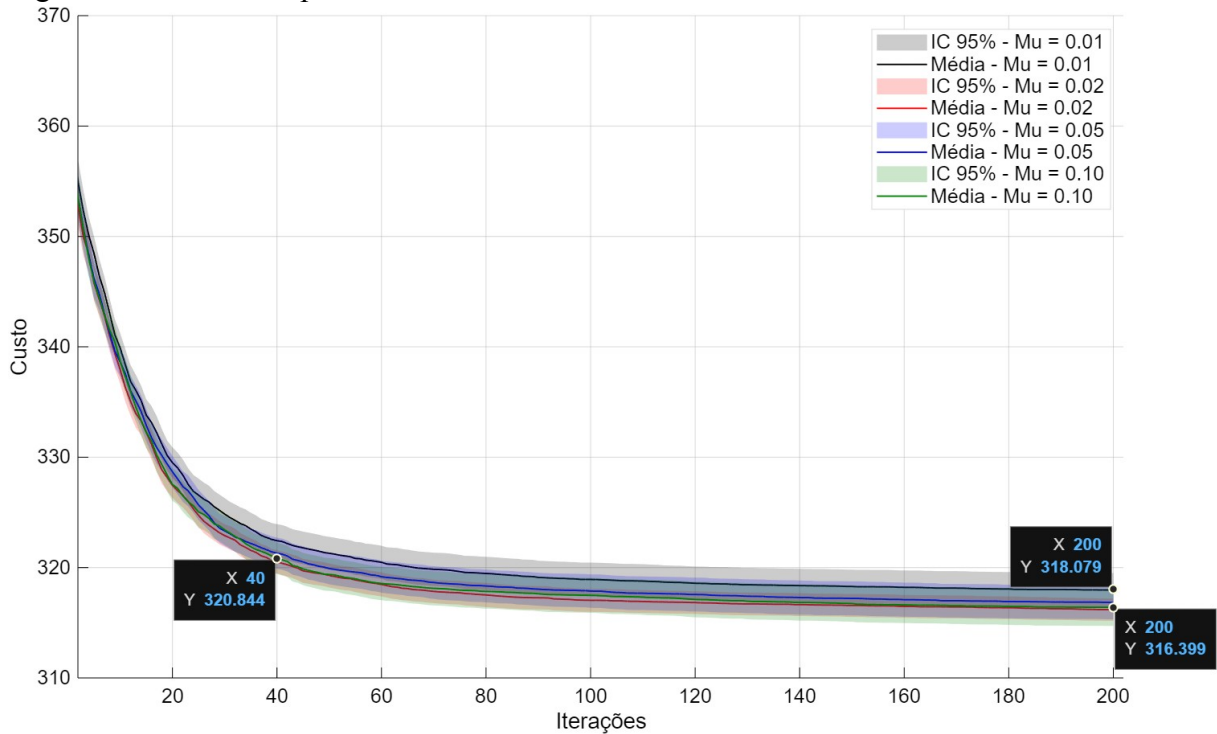
#### 4.2.4.3 Taxa de mutação

Para concluir a parametrização do NSGA-II, avaliou-se o impacto da taxa de mutação ( $Mu$ ) nos resultados do algoritmo. Para analisar sua influência, foram testados os valores 0,01; 0,02; 0,05 e 0,1. Conforme ilustrado na Figura 30, o menor valor apresentou desempenho ligeiramente inferior em comparação com os demais, os quais exibiram resultados relativamente semelhantes, com alguma sobreposição nos intervalos de confiança. Essas observações indicam que o aumento da taxa de mutação não implica, necessariamente, na melhoria da qualidade das soluções, evidenciando a necessidade de se adotar um valor intermediário. Dessa forma, optou-se por estabelecer  $Mu = 0,04$ .

#### 4.2.5 Tempo Total de Parametrização

A Tabela 6 apresenta os tempos de execução necessários para a parametrização de cada um dos algoritmos.

Observou-se uma discrepância significativa no tempo de parametrização do algoritmo FA em comparação aos demais, tendo sido registrado um total de 66,75 horas. Esse resultado deve-se, em grande parte, à sensibilidade do FA aos valores testados para  $PopVag$ , o que acarreta um aumento crítico no custo computacional mesmo para variações relativamente pequenas

Figura 30 – Varredura para valores de  $\mu$ .

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Tempo de execução para a parametrização de cada algoritmo.

Algoritmo	Tempo total em minutos	Tempo total em horas
PSO	1.911,86	31,86
FA	4.005,29	66,75
BBO	1.009,01	16,82
NSGA-II	2.149,66	35,83

Fonte: Próprio autor.

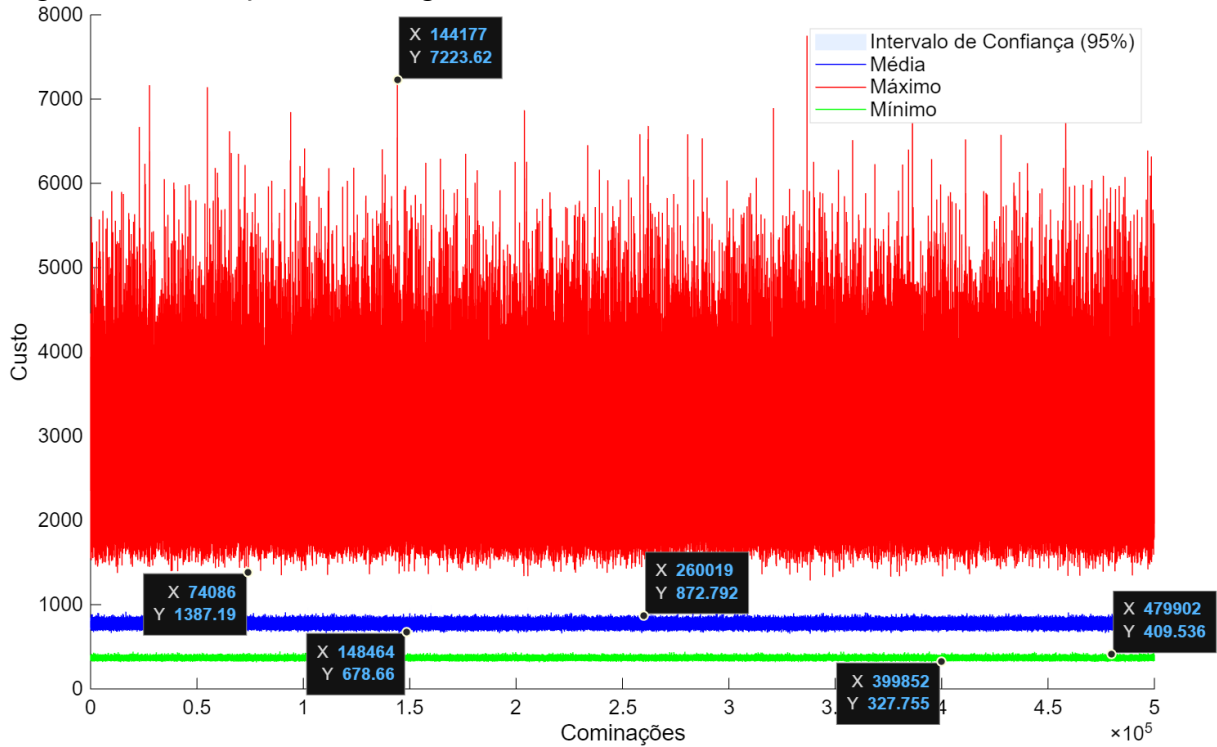
desse parâmetro. Em contrapartida, o algoritmo BBO demonstrou ser o de parametrização mais simples, necessitando de apenas 16,82 horas para a avaliação de seus parâmetros, o que evidencia uma baixa variação no custo computacional ao variar suas configurações.

### 4.3 Execução da Abordagem Randômica

Conforme descrito na Seção 4.1, para possibilitar a comparação direta com os algoritmos bio-inspirados, foi desenvolvida uma abordagem randômica cuja premissa consiste na seleção aleatória de 5 enlaces, respeitando os limites estabelecidos para a escolha das antenas. Adicionalmente, estipulou-se que cada combinação deve formar enlaces com antenas únicas, de modo a evitar a repetição de configurações previamente geradas. Para explorar ao máximo essa abordagem, fixou-se o número total de combinações aleatórias em 500.000, partindo do

pressuposto de que o projetista selecionará aleatoriamente 500.000 configurações e calculará o custo associado a cada uma delas. A avaliação dessa execução foi realizada por meio de 150 execuções de MC, e os resultados estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Execução da abordagem randômica.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se, inicialmente, que o intervalo de confiança de 95% para o custo médio é praticamente imperceptível, fato atribuído tanto ao elevado número de combinações geradas — que reduz o espaçamento no eixo X — quanto à baixa variabilidade do custo médio. Em contrapartida, os custos máximos evidenciaram uma ampla variação, indicando que a probabilidade de uma combinação aleatória resultar em um custo excessivamente alto é significativa. Por sua vez, a variação dos custos mínimos apresentou a menor amplitude entre as métricas avaliadas. O tempo total de execução para a obtenção dessas combinações foi de 21,13 horas, um valor considerado adequado, visto que não foi necessária a parametrização prévia do código antes de sua execução.

#### 4.4 Análise Comparativa dos Resultados

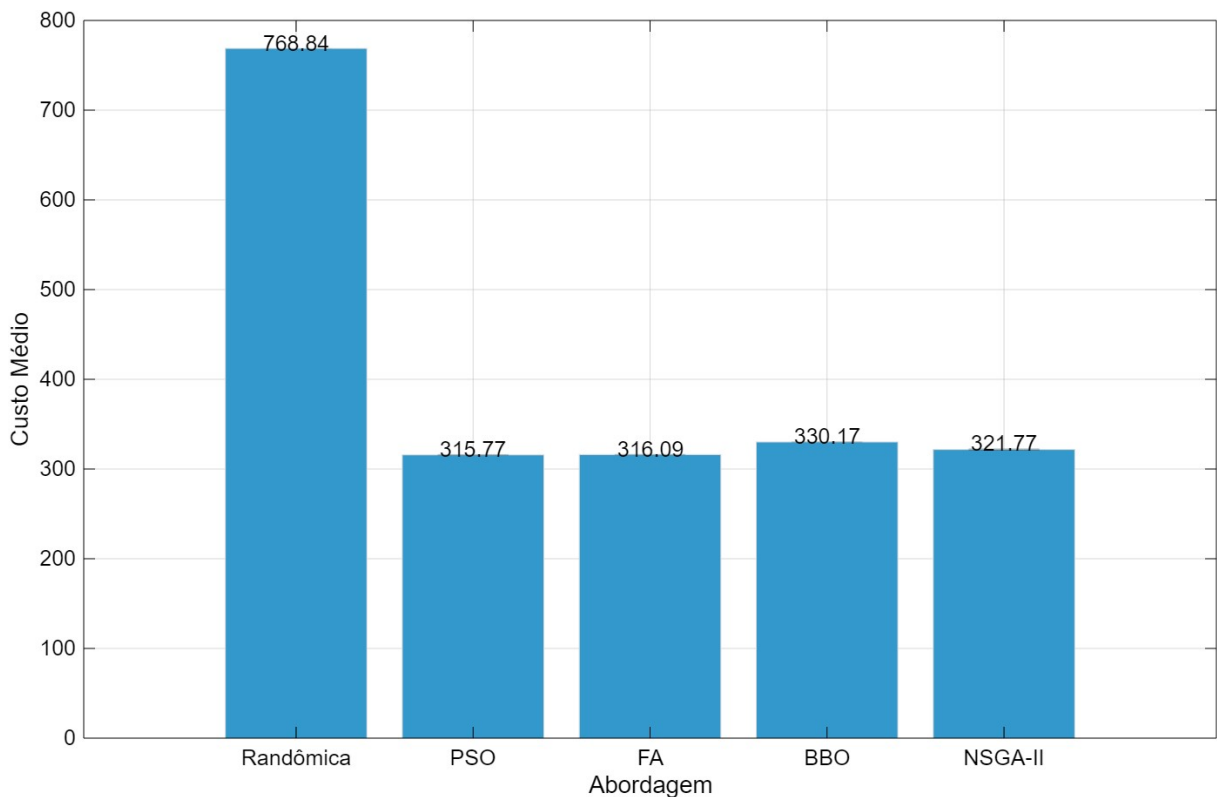
Nesta seção será realizada a análise comparativa dos resultados obtidos. Primeiramente será realizada a comparação entre a abordagem randômica e os algoritmos bioinspirados.

Em seguida, também será realizada a análise comparativa entre as duas classes de heurísticas: inteligência de enxames e computação evolucionária.

#### 4.4.1 Abordagem randômica versus algoritmo bioinspirado

Para avaliar o desempenho global de cada abordagem, foram executadas 50 repetições de MC, adotando-se um intervalo de confiança de 95%. A Figura 32 apresenta os resultados comparativos em termos do custo médio.

Figura 32 – Comparativo do custo médio entre a abordagem randômica e os algoritmos bioinspirados.



Fonte: Próprio autor.

A princípio, observa-se que os algoritmos bioinspirados superam claramente a técnica randômica. Em comparação com todas as heurísticas analisadas, o custo médio resultante das escolhas aleatórias foi mais que o dobro do verificado para os demais métodos, ressaltando a complexidade de identificar combinações de enlaces capazes de oferecer um resultado satisfatório. Tal constatação também encontra respaldo na Figura 31. Além disso, a Tabela 7 resume os tempos de execução de cada abordagem.

De modo geral, o algoritmo PSO apresentou o maior tempo de execução, mas, em contrapartida, obteve o melhor resultado em termos de custo médio, seguido por FA, NSGA-II e

Tabela 7 – Tempo de execução para cada abordagem.

Abordagem	Tempo total em minutos	Tempo total em horas
Randômica	146,11	2,44
PSO	245,63	4,09
FA	89,31	1,49
BBO	89,31	1,49
NSGA-II	145,07	2,42

Fonte: Próprio autor.

BBO. Na Tabela 8, encontram-se os valores mínimos de custo encontrados em cada abordagem, bem como os índices das antenas que compõem os enlaces da rede.

Tabela 8 – Soluções retornadas para cada abordagem.

Abordagem	Antenas escolhidas	Custo final
Randômica	[T174-R53] [T175-R146] [T60-R106] [T134-R144] [T68-R89]	325,70
PSO	[T180-R72] [T71-R112] [T80-R100] [T1-R132] [T178-R152]	304,38
FA	[T176-R139] [T2-R116] [T73-R173] [T1-R111] [T180-R81]	311,83
BBO	[T69-R3] [T53-R154] [T4-R100] [T178-R79] [T175-R137]	322,02
NSGA-II	[T1-R111] [T51-R79] [T178-R147] [T176-R132] [T1-R112]	309,60

Fonte: Próprio autor.

#### 4.4.2 Inteligência de Enxames versus Computação Evolucionária

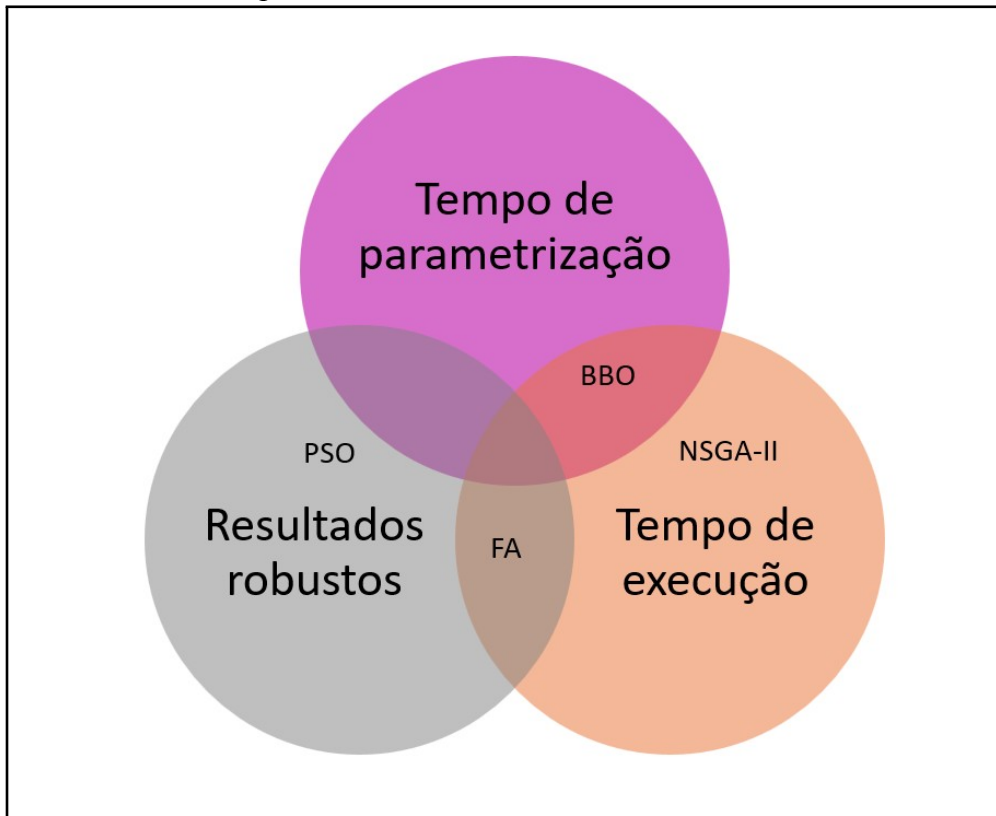
As simulações realizadas indicam uma ligeira vantagem dos algoritmos de Inteligência de Enxames (PSO e FA) em comparação com as abordagens de Computação Evolucionária (BBO e NSGA-II), considerando o problema em estudo. Embora a diferença nos valores absolutos do custo médio não seja acentuada, alguns fatores, como o tempo de parametrização, merecem atenção.

Conforme destacado na Tabela 6, os algoritmos de Inteligência de Enxames apresentaram um tempo de parametrização relativamente elevado, enquanto as abordagens de Computação Evolucionária, especialmente o BBO, demandaram menos recursos nesse aspecto. Em particular, o NSGA-II chegou a registrar um tempo de parametrização superior em mais do que o dobro do observado para o BBO, mesmo sem evidenciar diferença expressiva no custo médio entre as duas abordagens. Dessa forma, demonstra-se que o BBO constitui uma opção adequada para problemas de otimização de menor complexidade, por apresentar baixo custo computacional e resultados modestos. Por outro lado, os algoritmos de Inteligência de Enxames podem ser mais

apropriados para desafios de maior complexidade, mesmo que impliquem em maior tempo de execução e custo computacional.

A Figura 33 ilustra os pontos fortes atribuídos a cada uma das meta-heurísticas, considerando o tempo de parametrização, o tempo de execução e a robustez dos resultados.

Figura 33 – Ilustrativo dos pontos fortes atribuídos a cada meta-heurística.



Fonte: Próprio autor.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados, é possível responder às Questões de Pesquisa (QP) apresentadas na Seção 1.2. A seguir, apresenta-se a análise de cada questão:

- **QP1.** É viável avaliar, para um cenário com múltiplas antenas, todas as possíveis configurações para a implantação dos enlaces de rádio?

**Resposta:** Não. Conforme ilustrado na Figura 15, a avaliação combinatória dos múltiplos enlaces resulta em um número de soluções da ordem de  $2.66 \times 10^{20}$ , o que excede amplamente as capacidades computacionais atuais. Para efeito comparativo, mesmo considerando uma avaliação de cada solução em 1 microssegundo, o tempo total necessário seria da ordem de 8,43 milhões de anos.

- **QP2.** As técnicas de geoprocessamento, implementadas por meio do *software* Python, apresentam precisão suficiente para uma análise detalhada do terreno estudado?

**Resposta:** Sim. Conforme demonstrado nas Figuras 13a e 13b, os resultados da análise topográfica evidenciam uma precisão expressiva, comportamento que se repete nas demais etapas do estudo, confirmando a eficácia da abordagem adotada.

- **QP3.** Dentre as meta-heurísticas aplicadas neste trabalho, qual delas oferece o melhor desempenho global?

**Resposta:** Em termos de qualidade das soluções, o algoritmo bioinspirado PSO apresentou resultados mais robustos, embora as diferenças no custo médio entre as abordagens não tenham sido expressivamente significativas.

- **QP4.** Existem diferenças significativas entre os métodos baseados em Inteligência de Enxames e os baseados em Computação Evolucionária?

**Resposta:** Conforme discutido na Seção 4.4.2, ambas as abordagens oferecem resultados satisfatórios. Todavia, dependendo do objetivo da aplicação, podem ser considerados aspectos distintos: enquanto a Inteligência de Enxames tende a proporcionar soluções mais robustas (a despeito de um custo computacional elevado), a Computação Evolucionária – especialmente por meio da meta-heurística BBO – se revela vantajosa quando há restrições quanto ao tempo de parametrização, mesmo que os resultados sejam relativamente mais modestos.

- **QP5.** Qual é a diferença, em termos de qualidade da rede, entre a seleção aleatória das posições das antenas e as soluções obtidas por meio das meta-heurísticas?

**Resposta:** Os resultados obtidos pelas meta-heurísticas superaram de forma significa-

tiva a abordagem randômica. Enquanto a seleção aleatória resultou em um custo médio de 768,84, o algoritmo BBO – o menos expressivo dentre os testados – apresentou um custo médio de 330,17, representando menos da metade do valor encontrado na abordagem aleatória.

Embora os resultados apresentados sejam encorajadores, identificam-se oportunidades para aprimoramento e expansão deste estudo. Nesse sentido, propõe-se como direções futuras:

- Desenvolver uma metodologia que, em vez de empregar um custo adimensional para a qualidade da rede, permita sua avaliação em termos monetários (reais);
- Investigar a viabilidade de uma antena desempenhar funções tanto de transmissora quanto de receptora;
- Aplicar a metodologia a áreas com topografias mais desafiadoras, como regiões serranas, a fim de verificar a robustez dos resultados;
- Propor abordagens que possibilitem a variação da frequência de operação, adaptando esse parâmetro às condições geográficas específicas;
- Elaborar uma abordagem que considere a variação dos parâmetros das antenas, como diferentes valores de ganho e potência de transmissão;
- Adotar métodos mais sofisticados para o cálculo da área de cobertura e escalabilidade, visando maior precisão na avaliação.

## REFERÊNCIAS

- ADEDIJI, A. T.; AJEWOLE, M. O.; FALODUN, S. E. Distribution of radio refractivity gradient and effective earth radius factor (k-factor) over akure, south western nigeria. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 73, n. 16, p. 2300–2304, 2011.
- AGUIAR, A. L. S. Proposta de rede gpon usando pso. **Monografia de Graduação: Curso de Engenharia Elétrica, Câmpus de Sobral, Universidade Federal do Ceará**, Sobral, 2022.
- ALENCAR, M. S.; A.LOPES, W. T.; MADEIRO, F. History of television in brazil. **Second Region 8 IEEE Conference on the History of Communications**, 2010.
- ARAUJO, J. R. de; FERREIRA, E. F. e; ABREU, M. H. N. G. de. Revisão sistemática sobre estudos de espacialização da dengue no brasil. **Miscellaneous**, v. 11, n. 4, p. 696–708, 2008.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.
- CASTRO, D. C. C. de; RODRIGUES, R. S. S.; FILHO, D. F. F. Escoamento superficial na área convergente aos lagos bolonha e Água preta em belém e ananindeua, para. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, 2020.
- CESAD. **PROPAGAÇÃO DA LUZ NOS MEIOS MATERIAIS: REFLEXÃO, REFRAÇÃO E DISPERSÃO**. 2022. Disponível em: [https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15162916022012Fisica\\_C\\_Aula\\_8.pdf](https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15162916022012Fisica_C_Aula_8.pdf). Acesso em: 10 dez. 2024.
- COMER, D. E. **Redes de Computadores e Internet**. [S. l.]: Bookman Editora, 2016. 584 p.
- DEB, K.; GOEL, T. Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithms for better convergence. **Indian Institute of Technology Kanpur**, 2001.
- DELMONDES, R. da C.; OLIVEIRA, K. de. Aplicações de algoritmos bioinspirados para estimação de rotas em um arranjo circular de antenas adaptativas. **Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Telecomunicações: Prédios Inteligentes, Instituto Federal de Goiás (IFG)**, 2018.
- EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. **Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science**, 1995.
- FAGUNDES, I. F. **Previsão da Atenuação por Chuvas a partir de Dados Meteorológicos Globais**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.
- FARINA, F. C. Abordagem sobre as técnicas de geoprocessamento aplicadas ao planejamento e gestão urbana. **Miscellaneous**, v. 4, n. 4, p. 01–13, 2006.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R. E.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRÍGUEZ, E.; ROTH, L. E.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J. W.; WERNER, M.; OSKIN, M. E.; BURBANK, D. W.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.
- FELICE, F. **Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4GHz em tecnologia *spread spectrum***. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

FERREIRA, R. J. Como medir o raio de curvatura da terra com auxílio de um canal de navegação. **Miscellaneous**, v. 23, n. 2, p. 236–237, 2001.

HEILMANN, C. A. D. e A. **Teoria do campo eletromagnético e propagação de ondas**. [S. l.]: Clube de Autores, 2021. 287 p.

HOFFMANN, L. T.; GOMEZ, A. T. Uma abordagem do problema de localização de torres de rádio transmissão auxiliado por um sistema de informação geográfica. **XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)**, 2003.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. [S. l.]: University of Michigan Press, 1975.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.

INFORMATION, C. C. for S. **SRTM Data Download**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <https://srtm.csi.cgiar.org/download>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. 2022. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.

JUNIOR, J. I. R. B. Análise de desempenho de um enlace ponto a ponto entre meruoca e sobral. **Monografia de Graduação: Curso de Engenharia Elétrica, Câmpus de Sobral, Universidade Federal do Ceará**, Sobral, 2022.

LAGE, E. Ondas eletromagnéticas. **Revista de Ciência Elementar**, U. Porto, 2024.

LAWHEAD, J. **Learning Geospatial Analysis with Python**. [S. l.]: Packt Publishing, 2013. 364 p.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. 4th. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.

MA, H.; SIMON, D.; SIARRY, P.; YANG, Z.; FEI, M. Biogeography-based optimization: A 10-year review. **Miscellaneous**, v. 1, n. 5, p. 391–407, 2017.

MANNING, T. **Microwave radio transmission design guide**. [S. l.]: Collection, 2009. v. 2.

MARIA, E. A. A. D.; BUDIMAN, E.; HAVILUDDIN, H.; TARUK, M. Measure distance locating nearest public facilities using haversine and euclidean methods. **Institute of Physics Open Access Journal Titles**, v. 1450, n. 1, 2020.

MARQUES, T. M. Elaboração de software em python para cálculo da margem de sistemas de radioenlaces ponto a ponto na faixa de 3 a 33 ghz. **Monografia de Graduação: Curso de Engenharia Elétrica, Câmpus Universitário de Palmas, Universidade Federal do Tocantins**, Palmas, 2021.

MARTINS, L. F. B. **APLICACÃO DE ALGORITMOS BIO-INSPIRADOS NA PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE AMORTECIMENTO E DISPOSITIVO FACTS UPFC**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2017.

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity and Magnetism: by James Clerk Maxwell**. 1873.

MELO, M. V. P. Projeto de radioenlace ponto a ponto utilizando frequência de 2.4 ghz para comunicação de dados. **Monografia de Graduação: Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e informática, Universidade Federal de Campina Grande**, Campina Grande, 2009.

MENEZES, S. L.; FREITAS, R. S.; PARPINELLI, R. S. Mineração em grandes massas de dados utilizando hadoop mapreduce e algoritmos bio-inspirados: Uma revisão sistemática. **Miscellaneous**, v. 23, 2016.

METEOROLOGIA, I. N. de. **Dados Históricos - INMET**. Acessado em: 27 de janeiro de 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

M.N., S. M.; PATRA, C. K.; KANDUKURI, S.; KUMARA, V.; SONI, V. K. An estimation of atmospheric attenuation on an earth-space radio link operating at ka-band over larsemann hills area of antarctica. **Elsevier ScienceDirect Journals**, 2024.

OBERZINER, A. P. B. As equações de maxwell e aplicações. **Departamento de Matemática: Curso de Matemática, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2008.

oES, A. N. de T. **Portaria Anatel nº 2905, de 25 de setembro de 2024**. 2024. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/component/content/article/166-portarias-normativas/2024/1978-portaria-2905>.

oES, M. das C. **Plano de Atribuição, Distribuição e Destinação de Radiofrequências**. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiofrequencia/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>. Acesso em: 26 nov. 2024.

PENG, J. Studying ht-mess in ieee 802.11n networks via simulations. **The 15th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT)**, Hasselt, 2024.

PIAUI, D. de B. **Projeto de dimensionamento de enlace de rádio associado a atenuações devido à chuva utilizando Celplan e Pathloss**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2013.

PINHEIRO, P. M. R. Análise de cobertura de área geográfica a partir de dados disponibilizados por software de predição de cobertura de radiofrequência. **Monografia de Graduação: Universidade Estadual do Maranhão, Centro de Ciências Tecnológicas, Curso de Engenharia de Computação**, São Luís, 2019.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 57, n. 4, p. 241–262, 2003.

R.REEVES, C.; E.ROWE, J. **GENETIC ALGORITHMS: PRINCIPLES AND PERSPECTIVES: A Guide to GA Theory**. [S. l.]: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.

SERANI, A.; LEOTARDI, C.; IEMMA, U.; CAMPANA, E. F.; FASANO, G.; DIEZ, M. Parameter selection in synchronous and asynchronous deterministic particle swarm optimization for ship hydrodynamics problems. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 49, p. 313–334, 2016.

SILIPRANDE, M. D.; CORTES, J. M. R.; BRANDÃO, R. de S. Modelo multi-objetivo para o problema de localização de antenas de transmissão para internet a rádio no município de itaperuna. **XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)**, 2008.

SILVA, P. F. J. da. Evolução das telecomunicações e integração territorial do brasil. **Revista Novidades en Poblacion**, 2014.

SIMON, D. Biogeography-based optimization. **Miscellaneous**, v. 12, n. 6, p. 702–713, 2008.

SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S. de; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados srtm. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 46–57, 2010.

TIGHZERT, L.; FONLUPT, C.; MENDIL, B. A set of new compact firefly algorithms. **Elsevier ScienceDirect Journals**, v. 40, p. 92–115, 2017.

UNIAO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACOES. **Recomendação ITU-R P.838-3: Modelo de atenuação específica devido à chuva para uso em métodos de previsão**. Genebra, 2005. Acessado em: 17/12/2024. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/r-rec-p.838-3-200503-i/en>.

UNIAO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACOES. **Recomendação ITU-R P.837-7: Características da precipitação para modelagem de propagação**. Genebra, 2017. Acessado em: 16/12/2024. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.837/en>.

UNIAO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACOES. **Recommendation P.530-17: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems**. Genebra, 2017. Acessado em: 27/01/2025. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-17-201712-S/en>.

VIEIRA, J. S. Estudo de propagação de onda eletromagnética em estrutura geológica estratificada. **Dissertação: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2003.

XING, Z.; HU, S.; DING, R.; YAN, T.; XIA, X.; XU, W. Multi-sensor dynamic scheduling for defending uav swarms with fresnel zone under complex terrain. **Elsevier ScienceDirect Journals**, 2024.

YANG, X.-S. Firefly algorithm. **Wiley Online Library**, p. 79–90, 2008.

ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento conceitos e definições. **Miscellaneous**, v. 7, n. 2, 2017.

## APÊNDICE A – CÓDIGO PARA EXTRAIR AS COORDENADAS DE UM ARQUIVO KML

O código a seguir foi utilizado para extrair as coordenadas do arquivo KML extraído diretamente do Google Earth.

Código-fonte 1 – Código Python para extração de coordenadas

```
1 # Importa a biblioteca para manipulação de arquivos XML ,  
   incluindo KML  
2 from xml.etree import ElementTree as ET  
3  
4 # Caminho para o arquivo KML que contém as informações das  
   antenas transmissoras  
5 kml_file = "C:\\Documents\\Antenas transmissoras.kml"  
6  
7 # Caminho para o arquivo de saída onde as coordenadas extraídas  
   serão salvas  
8 output_txt = "C:\\Documents\\Antenas transmissoras.txt"  
9  
10 # Carregar o arquivo KML e criar uma estrutura de árvore para  
    manipulação:  
11  
12 # Lê o arquivo KML e transforma em uma estrutura manipulável (árvore)  
13 tree = ET.parse(kml_file)  
14  
15 # Obter o elemento raiz do arquivo KML  
16 root = tree.getroot()  
17  
18 # Definir os namespaces usados no arquivo KML, necessários para  
    localizar elementos corretamente  
19 namespace = {'kml': 'http://www.opengis.net/kml/2.2'}  
20  
21 # Abrir o arquivo de saída para salvar as coordenadas extraídas
```

```
22 with open ( output_txt , 'w ' ) as f :
23     # Escrever o cabe ç alho do arquivo para indicar o formato das
        informa ç õ es
24     f. write ( " Latitude , Longitude \n " )
25
26     # Iterar sobre todos os elementos < Placemark > no arquivo KML
27     for placemark in root . findall ( ' .// kml : Placemark ' , namespace )
        :
28         # Dentro de cada Placemark , buscar o elemento <
            coordinates > que contém as informa ç õ es geogr á ficas
29         coords = placemark . find ( ' .// kml : coordinates ' , namespace )
30         # Verificar se as coordenadas existem
31         if coords is not None :
32             # Separar os valores de longitude , latitude e
                altitude
33             lon , lat , *_ = map ( float , coords . text . strip () . split (
                    " , " ) )
34
35             # Escrever as coordenadas formatadas no arquivo de
                sa í da ( somente latitude e longitude )
36             f. write ( f "{ lat } , { lon } \n " )
37
38     # Mensagem de confirma ç ã o ao final da execu ç ã o
39     print ( f " Todas as coordenadas ( latitude e longitude ) foram salvas
        no arquivo { output_txt } " )
```

## APÊNDICE B – CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DE ALTITUDES

O código a seguir foi utilizado para consultar altitudes a partir de coordenadas geográficas por meio da API Open Topo Data.

Código-fonte 2 – Código Python para obtenção de altitudes

```
1 # Importa bibliotecas necess á rias
2 import requests
3 import time
4
5 # Arquivo de entrada e sa í da
6 # Caminho para o arquivo que cont é mas coordenadas no formato :
   latitude , longitude
7 input_file = 'C :\\ Users \\ Documents \\ coordenadas . txt '
8 # Caminho para o arquivo de sa í da que conter á as coordenadas e
   as altitudes obtidas
9 output_file = "C :\\ Users \\ Documents \\ altitudes . txt "
10 # Caminho para o arquivo de log de erros
11 error_log = "C :\\ Users \\ Documentserror_log . txt "
12
13 def pegar_altitude ( latitude , longitude , retries =3 , timeout =10 ) :
14
15 # Faz uma consulta à Open Topo Data API para obter a altitude de
   uma coordenada geogr á fica .
16 # Implementa um mecanismo de re - tentativa em caso de falha na
   conex ão ou erro da API .
17
18 # Par â metros :
19 # latitude ( float ) : Latitude da coordenada .
20 # longitude ( float ) : Longitude da coordenada .
21 # retries ( int ) : N ú merde tentativas em caso de falha . Padr ã
   o : 3.
22 # timeout ( int ) : Tempo limite ( em segundos ) para a resposta
   da API . Padr ão : 10.
23
```

```
24 # Retorna :
25 # float : Altitude em metros se obtida com sucesso , ou None em
    caso de erro .
26
27 # URL da API com as coordenadas
28 url = f" https :// api . opentopodata . org / v1 / srtm90m ? locations = {
    latitude } , { longitude } "
29
30 for attempt in range ( retries ) : # Loop de tentativas
31     try :
32         # Envia a requisi çã o GET para a API
33         response = requests . get ( url , timeout = timeout )
34
35         # Verifica se a resposta foi bem - sucedida
36         if response . status_code == 200:
37             data = response . json ()
38             # Verifica se há resultados válidos na resposta
39             if " results " in data and len ( data [ " results " ]) > 0:
40                 return data [ " results " ][0][ " elevation " ] #
                    Retorna a altitude
41             else :
42                 return None # Nenhum resultado encontrado
43         else :
44             # Log de erro da API
45             print (f" Tentativa { attempt + 1 } / { retries } - Erro na
                    API : { response . status_code } ")
46     except requests . exceptions . RequestException as e:
47         # Log de erro de conexão
48         print (f" Tentativa { attempt + 1 } / { retries } - Erro de
                    conexão : { e } ")
49
50     # Aguarda antes de tentar novamente
51     time . sleep (2)
52
```

```
53 return None # Retorna None se todas as tentativas falharem
54
55 def processar_coordenadas ( input_file ,      output_file ) :
56
57 # Lê um arquivo com coordenadas geográficas , obtém a altitude
    para cada uma e salva em um arquivo de saída .
58
59 # Parâmetros :
60 # input_file ( str ) : Caminho do arquivo de entrada com as
    coordenadas .
61 # output_file ( str ) : Caminho do arquivo de saída para salvar as
    coordenadas e altitudes .
62
63 # Abre os arquivos de entrada , saída e log de erros
64 with open ( input_file , " r" ) as infile , open ( output_file , "w" ) as
    outfile , open ( error_log , "w" ) as errfile :
65 for line in infile : # Itera sobre cada linha do arquivo de
    entrada
66     try :
67         # Remove espaços em branco e divide latitude e longitude
68         latitude , longitude = map ( float , line . strip () . split ( " ," )
        )
69
70         # Obtém a altitude usando a função pegar_altitude
71         altitude = pegar_altitude ( latitude , longitude )
72
73         if altitude is not None :
74             # Escreve as coordenadas e a altitude no arquivo de
                saída
75             outfile . write ( f" { latitude } , { longitude } , { altitude :.2 f
                }\n" )
76             print ( f" Coordenada ( { latitude } , { longitude } ) ->
                Altitude : { altitude :.2 f } metros " )
77         else :
```

```
78     # Registra erro no arquivo de saída e no log de
79     erros
80     outfile . write ( f" { latitude } ,{ longitude } , Erro \n" )
81     errfile . write ( f" Erro ao obter altitude para ( {
82         latitude } , { longitude } ) \n" )
83     print ( f" Erro ao obter altitude para ( { latitude } , {
84         longitude } ) " )
85 except Exception as e :
86     # Log de exceção esno processamento da linha
87     errfile . write ( f" Erro ao processar linha : { line . strip ( ) }
88         -> { e } \n " )
89     print ( f" Erro ao processar linha : { line . strip ( ) } -> { e } " )
90
91 # Executa o processamento das coordenadas
92 processar_coordenadas ( input_file , output_file )
```

## APÊNDICE C – CÓDIGO PARA A LOCALIZAÇÃO DE OBSTÁCULOS

O código a seguir foi utilizado para localizar o maior obstáculo existente entre cada possível enlace, assim como o valor de sua altitude.

Código-fonte 3 – Código Python para localização de obstáculos

```

1 # Importa as bibliotecas necessárias
2 import rasterio
3 import numpy as np
4 from tqdm import tqdm
5
6 # Caminhos para os arquivos de entrada e saída :
7
8 # Arquivo .txt com as coordenadas das antenas transmissoras
9 transmissoras_file = "C:\\Documents \\ Antenas transmissoras .txt "
10 # Arquivo .txt com as coordenadas das antenas receptoras
11 receptoras_file = " C :\\ Documents \\ Antenas receptoras .txt "
12 # Arquivo .tif com o raster da região
13 raster_file = "C :\\ Documents \\ Rasterio .tif "
14 # Arquivo .txt que irá armazenar os dados de saída
15 output_file = "C :\\ Documents \\ Obstaculos .txt "
16
17 # Função para encontrar o ponto de maior altitude entre dois
18     pontos :
19
20 # Essa função calcula pontos intermediários entre a transmissora
21     e a receptora e verifica a altitude de cada um .
22 def encontrar_obstaculo_critico ( raster_path , lat1 , lon1 , lat2 ,
23     lon2 , num_points =150) :
24     # Abrindo o arquivo raster com dados de elevação do terreno
25     with rasterio . open ( raster_path ) as dataset :
26         altitudes = [] # Lista para armazenar as altitudes ao
27             longo da linha de visão
28         coords = [] # Lista para armazenar as coordenadas
29             correspondentes

```

```
25
26     # Gerar pontos ao longo da linha de visã o entre as
           coordenadas inicial e final
27     lats = np.linspace ( lat1 , lat2 , num_points ) # Interpolar
           latitudes
28     lons = np.linspace ( lon1 , lon2 , num_points ) # Interpolar
           longitudes
29
30     # Iterar sobre os pontos interpolados
31     for lat , lon in zip ( lats , lons ):
32         try :
33             # Converter latitude e longitude para índices de
           linha e coluna no raster
34             row , col = dataset.index ( lon , lat )
35             # Obter a altitude no ponto correspondente
36             altitude = dataset.read (1) [ row , col ]
37             altitudes.append ( altitude ) # Armazenar a
           altitude
38             coords.append (( lat , lon )) # Armazenar a
           coordenada
39         except IndexError :
40             # Caso a coordenada esteja fora dos limites do
           raster
41             altitudes.append ( float ( '- inf ')) # Adicionar
           valor muito baixo para ignorar
42             coords.append (( lat , lon ))
43
44     # Identificar o ponto com a maior altitude
45     max_index = np.argmax ( altitudes ) # Obter o índice da
           maior altitude
46     return coords [ max_index ][0] , coords [ max_index ][1] ,
           altitudes [ max_index ] # Retornar latitude , longitude
           e altitude
47
```

```

48 # Fun çã oprincipal
49
50 # Lê os arquivos de transmissoras e receptoras e calcula o ponto
    de maior altitude para cada enlace .
51 def process_links ( transmitters_file , receivers_file , raster_file
    , output_file ):
52     # Ler coordenadas das antenas transmissoras a partir do
        arquivo
53     with open ( transmitters_file , 'r' ) as f :
54         transmitters = [ tuple ( map ( float , line . strip () . split ( ',' )
            )) for line in f . readlines () ]
55
56     # Ler coordenadas das antenas receptoras a partir do arquivo
57     with open ( receivers_file , 'r' ) as f :
58         receivers = [ tuple ( map ( float , line . strip () . split ( ',' ) )
            for line in f . readlines () ]
59
60     # Abrir o arquivo de saída para registrar os resultados
61     with open ( output_file , 'w' ) as output :
62         # Escrever o cabe çalho no arquivo de saída
63         output . write ( " Ligac ão , Latitude do ponto crítico ,
            Longitude do ponto crítico , Altitude do ponto crítico
            \n " )
64
65     # Iterar sobre cada antena transmissora
66     for i , ( lat_t , lon_t ) in enumerate ( tqdm ( transmitters ,
            desc = " Processando transmissoras " , unit = " antena " ) ):
67         # Iterar sobre cada antena receptora para a
            transmissora atual
68         for j , ( lat_r , lon_r ) in enumerate ( tqdm ( receivers ,
            desc = f" Processando receptoras para transmissora {
            i +1} " , leave = False , unit = " antena " ) ):
69             # Determinar o ponto de maior altitude no enlace
                entre transmissora e receptora

```

```
70         max_lat , max_lon , max_alt =  
            encontrar_obstaculo_critico ( raster_file ,  
            lat_t , lon_t , lat_r , lon_r )  
71         # Registrar os resultados no arquivo de saída  
72         output . write ( f " Ligac ão {i +1} -{ j +1} { max_lat }, {  
            max_lon }, { max_alt }\n" )  
73  
74         # Executar o processamento  
75         # Essa função será chamada para calcular e registrar as  
            altitudes críticas para cada enlace .  
76 process_links ( transmissoras_file , receptoras_file , raster_file ,  
            output_file )
```

## APÊNDICE D – CÓDIGO PARA CALCULAR O CUSTO DE QUALIDADE DA REDE

O código a seguir foi elaborado para avaliar o custo de qualidade associado a cada conjunto de enlaces.

Código-fonte 4 – Código em Matlab para o cálculo do custo de qualidade da rede.

```

1
2 function [ custo ] = avaliarRede ( posicao ,  transmissoras ,
3     receptoras ,  obstaculos ,  lambda , freq , P_t , G_t , G_r , N_0 )
4     % avaliarRede :  Calcula o custo total de uma rede de
5     radioenlaces ,  integrando
6     % diversos fatores ,  tais como perdas no enlace ,  diferen ç as
7     de altitude ,
8     % interfer ê ncia ,  dist â ncia entre antenas ,  qualidade do sinal
9     ( SINR ) ,
10    % escalabilidade e á rea de cobertura .
11    %
12    % Entradas :
13    % posicao - Matriz ( nLinks x 2) onde cada linha cont
14    ém [ tx_index , rx_index ]
15    % representando os índices da antena
16    transmissora e da antena receptora .
17    % transmissoras - Matriz com informa ç õ es das antenas
18    transmissoras ( incluindo coordenadas e altitude ) .
19    % receptoras - Matriz com informa ç õ es das antenas
20    receptoras ( incluindo coordenadas e altitude ) .
21    % obstaculos - Matriz com dados dos obst á culos ,  onde
22    cada linha corresponde a um obst á culo
23    % associado a uma combina ç ã o espec í fica de
24    antenas .
25    % lambda - Comprimento de onda ( calculado como c /
26    freq )
27    % freq - Frequ ê ncia de opera ç ã o ( Hz )
28    % P_t - Pot ê ncia de transmiss ã o ( dBm )
29    % G_t - Ganho da antena transmissora ( dB )

```

```

19 % G_r          - Ganho da antena receptora ( dB )
20 % N_0          - Nível de ruído do sistema ( valor em dBm
                ou convertido para escala linear )
21 %
22 % Saída :
23 % custo       - Valor final do custo da rede , obtido
                pela soma ponderada dos componentes de custo .
24
25 % Determinar o número total de enlaces
26 nLinks = size ( posicao , 1 ) ;
27
28 % Inicializar variáveis acumulativas para os diferentes
                componentes de custo
29 perdasTotal = 0; % Acumula as perdas totais do
                enlace ( em escala linear )
30 custoAltura = 0; % Acumula o custo associado à
                diferença de altura em relação aos obstáculos
31 interferenciaTotal = 0; % Acumula a interferência total ( em
                dB )
32 custoDistancia = 0; % Acumula o custo relacionado à
                distância entre antenas
33 sinrTotal = 0; % Acumula o valor do SINR ( Signal -
                to - Interference - plus - Noise Ratio )
34
35 % Parâmetros para o cálculo da atenuação devido à chuva :
36 ka = 0.09164;
37 alpha = 1.0568;
38 R = 0.2734;
39 gamma = ka * R^alpha ; % Fator de atenuação específico para
                chuvas
40
41 % Pré - computar as distâncias essenciais para o cálculo
42 % d_t_r : Distância entre a antena transmissora e a antena
                receptora .

```

```

43 % d_t_o : Distância entre a antena transmissora e o obstáculo
      associado .
44 % d_o_r : Distância entre o obstáculo e a antena receptora .
45 [ d_t_r , d_t_o , d_o_r ] = precomputarDistancias ( posicao ,
      transmissoras , receptoras , obstaculos );
46
47 % Loop principal : Avaliar cada enlace individualmente
48 for i = 1: nLinks
49     % Obter as coordenadas da antena transmissora e da
      antena receptora do i-ésimo enlace
50     t_i = transmissoras ( posicao ( i , 1 ) , : );
51     r_i = receptoras ( posicao ( i , 2 ) , : );
52
53     % Determinar o índice do obstáculo correspondente ao
      enlace :
54     % A fórmula ( tx_idx - 1 ) * 180 + rx_idx associa cada par
      de antenas a um obstáculo .
55     tx_idx = posicao ( i , 1 ) ;
56     rx_idx = posicao ( i , 2 ) ;
57     indice_obstaculo = ( tx_idx - 1 ) * 180 + rx_idx ;
58
59     % Obter os dados do obstáculo e a sua altitude
60     o_i = obstaculos ( indice_obstaculo , : );
61     alt_obst = o_i ( 3 ) ;
62
63     % Cálculo da zona de Fresnel adaptada para a frequência
      ( em Hz ) e distância ( em metros )
64     Fresnel = 0.55 * sqrt ( lambda * d_t_o ( i ) * d_o_r ( i ) / (
      d_t_o ( i ) + d_o_r ( i ) ) );
65     % Determinar a diferença de altura entre o obstáculo e
      as antenas
66     hExtra_t_o = Fresnel - ( alt_obst - t_i ( 3 ) ) ;
67     hExtra_o_r = Fresnel - ( r_i ( 3 ) - alt_obst ) ;
68

```

```

69 % Acumular o custo de altura considerando a antena mais
    pr ó xima do obst á culo
70 if d_t_o(i) < d_o_r(i)
71     custoAltura = custoAltura + abs(hExtra_t_o);
72 else
73     custoAltura = custoAltura + abs(hExtra_o_r);
74 end
75
76 % Acumular o custo relacionado à distância do enlace
77 custoDistancia = custoDistancia + d_t_r(i);
78
79 % Cá lculo das atenuaç õ es :
80 % L_fs : Atenuaç ã o no espa ço livre ( dB ) calculada com
    base na distância e na frequ ê ncia .
81 L_fs = calcularAtenuacao(d_t_r(i), freq);
82 % Ac : Atenuaç ã o causada pela chuva ( dB ), considerando a
    distância e o fator gamma .
83 Ac = gamma * d_t_r(i) * 1 e3;
84
85 % Cá lculo da pot ê ncia recebida ( em dBm ), considerando a
    pot ê ncia transmitida e as perdas
86 P_r = P_t + G_t + G_r - L_fs - Ac;
87
88 % Determinar a perda do enlace ( diferen ça entre a pot ê
    ncia transmitida e a pot ê ncia recebida )
89 perdaEnlace = P_t - P_r;
90 perdasTotal = perdasTotal + perdaEnlace;
91
92 % Cá lculo da interfer ê ncia no receptor :
93 % Para cada enlace diferente do atual , acumula - se a
    contribui ç ã o interferente .
94 P_interf = 0;
95 for j = 1: nLinks
96     if j ~= i

```

```

197         % Obter as coordenadas do transmissor do outro
198         enlace
199         t_j = transmissoras ( posicao ( j , 1 ) , : ) ;
200         % Calcular a distância entre o transmissor do
201         enlace j e o receptor do enlace i
202         d_interf = haversine ( t_j ( 1 : 2 ) , r_i ( 1 : 2 ) ) ;
203         % Calcular a atenuação para a interferência
204         L_interf = calcularAtenuacao ( d_interf , freq ) ;
205         % Acumular a potência interferente
206         P_interf = P_interf + ( P_t - L_interf ) ;
207     end
208 end
209
210 % Cálculo do SINR para o enlace i , que é a relação entre
211 a potência recebida e a soma do ruído e interferência
212
213 sinr = P_r / ( N_0 + P_interf ) ;
214 sinrTotal = sinrTotal + sinr ;
215 interferenciaTotal = interferenciaTotal + P_interf ;
216 end
217
218 % Converter a interferência total para escala linear (a
219 partir de dB )
220 interferenciaTotalLinear = 10 ^ ( interferenciaTotal / 10 ) ;
221
222 % Calcular o custo de escalabilidade com base na dispersão
223 espacial dos enlaces
224 custoEscalabilidade = calcularCustoEscalabilidade ( posicao ,
225 transmissoras , receptoras ) ;
226
227 % Definir a área máxima possível para normalização ( valor
228 previamente calculado )
229 maxAreaPossivel = 1 e6 ;
230 % Obter as coordenadas das antenas receptoras utilizadas nos

```

```

enlaces
123 coordsReceptoras = receptoras ( posicao (: , 2) , 1:2) ;
124 % Converter as coordenadas de graus para metros para o cá
    lculo da área de cobertura
125 coordsReceptorasMetros = converterCoordsParaMetros (
    coordsReceptoras );
126 % Calcular a área de cobertura normalizada no intervalo [0 ,
    1]
127 areaCoberturaNormalizada = calcularAreaCobertura (
    coordsReceptorasMetros , maxAreaPossivel ) ;
128
129 % Aplicar penalização dinâmica ao SINR total para ajustar a
    qualidade do enlace
130 sinrAjustado = penalizarSINR ( sinrTotal );
131
132 % Ajustar os componentes de custo para que fiquem em escalas
    comparáveis :
133 custo1 = perdasTotal * 1e -5; % Componente
    relacionado às perdas no enlace
134 custo2 = custoAltura / 10; % Componente
    relacionado à penalização de altura
135 custo3 = interferenciaTotalLinear * 1e218 ; % Componente
    relacionado à interferência ( ajustado )
136 custo4 = sinrAjustado * 1e250 ; % Componente
    derivado do SINR ajustado
137 custo5 = custoDistancia / 1e3 ; % Componente
    relacionado à distância do enlace
138 custo6 = custoEscalabilidade * 100; % Componente
    relacionado à escalabilidade
139 custo7 = (1 - areaCoberturaNormalizada ) * 100; % Componente
    relacionado à cobertura
140
141 % Definição dos pesos para cada componente , permitindo
    ajuste conforme prioridades do projeto

```

```

142 pesos = [4 , 3 , 4 , 3 , 1 , 2, 2];
143
144 % Cálculo do custo final como a soma ponderada dos
      componentes de custo
145 custo = sum ( pesos.* [ custo1 , custo2 , custo3 , custo4 , custo5
      , custo6 , custo7 ] );
146 end
147
148 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
149 % Função: precomputarDistancias
150 % Objetivo: Calcular as distâncias necessárias para a avaliação
      dos enlaces .
151 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
152 function [ d_t_r , d_t_o , d_o_r ] = precomputarDistancias ( posicao ,
      transmissoras , receptoras , obstaculos )
153 % Inicializa as matrizes de distância para cada enlace
154 nLinks = size ( posicao , 1 );
155 d_t_r = zeros ( nLinks , 1 ); % Distância entre transmissora e
      receptora
156 d_t_o = zeros ( nLinks , 1 ); % Distância entre a transmissora
      e o obstáculo
157 d_o_r = zeros ( nLinks , 1 ); % Distância entre o obstáculo e a
      receptora
158
159 % Itera sobre cada enlace para calcular as distâncias
      correspondentes
160 for i = 1:nLinks
161     % Extrai as coordenadas ( latitude , longitude ) da antena
      transmissora e da antena receptora
162     t_i = transmissoras ( posicao ( i , 1 ) , 1:2 );
163     r_i = receptoras ( posicao ( i , 2 ) , 1:2 );
164
165     % Calcula o índice do obstáculo associado ao enlace
166     tx_idx = posicao ( i , 1 );

```



```

191 % Objetivo : Calcular a atenuação no espaço livre ( L_fs ) em dB .
192 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
193 function L_fs = calcularAtenuacao ( distancia , freq )
194     c = 3 e8 ; % Velocidade da luz (m/s)
195     lambda = c / freq ; % Comprimento de onda (m)
196     % Cálculo da atenuação no espaço livre utilizando a fórmula
197     % padrão
198     L_fs = 20 * log10 ( 4 * pi * distancia / lambda );
199 end
200 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
201 % Função: penalizarSINR
202 % Objetivo : Aplicar penalização ao valor do SINR total ,
203 % ajustando-o conforme
204 % critérios preestabelecidos .
205 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
206 function sinrAjustado = penalizarSINR ( sinrTotal )
207     % Se o SINR total for inferior a -5 dB , aplica penalização
208     % severa .
209     if sinrTotal <= -5
210         sinrAjustado = 1 e3 ;
211     else
212         % Caso contrário , converte o SINR total para escala
213         % linear e aplica penalização .
214         sinrAjustado = 10^( - sinrTotal / 10 ) ;
215     end
216 end
217 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
218 % Função: haversine
219 % Objetivo : Calcular a distância entre dois pontos geográficos
220 % utilizando a fórmula de Haversine .
221 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
222 function distancia = haversine ( coord1 , coord2 )

```





```

dispersão espacial
274 %           dos nós utilizados nos enlaces . Um valor normalizado
           entre 0 e 1
275 %           é retornado , onde 0 indica melhor escalabilidade .
276 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
277 function custoEscalabilidade = calcularCustoEscalabilidade (
           posicao , transmissoras , receptoras )
278 % Extrair os índices das antenas utilizadas nos enlaces
279 tx_ids = posicao (: , 1) ;
280 rx_ids = posicao (: , 2) ;
281
282 % Obter as coordenadas ( latitude e longitude ) dos nós
           selecionados
283 coords_TX = transmissoras ( tx_ids , 1:2) ;
284 coords_RX = receptoras ( rx_ids , 1:2) ;
285
286 % Função anônima para calcular a dispersão média ( distância
           média entre todos os pares de pontos )
287 avgDispersion = @( coords ) mean ( pdist ( coords ) ) ;
288
289 % Calcular a dispersão média para os conjuntos de antenas
           transmissoras e receptoras
290 if size ( coords_TX ,1) > 1
291     avgDisp_TX = avgDispersion ( coords_TX ) ;
292 else
293     avgDisp_TX = 0 ;
294 end
295
296 if size ( coords_RX ,1) > 1
297     avgDisp_RX = avgDispersion ( coords_RX ) ;
298 else
299     avgDisp_RX = 0 ;
300 end
301

```

```
302 % Determinar a máxima dispersão possível para os conjuntos
      completos de antenas
303 allCoords_TX = transmissoras (:, 1:2);
304 allCoords_RX = receptoras (:, 1:2);
305
306 if size ( allCoords_TX ,1) > 1
307     maxDisp_TX = max ( pdist ( allCoords_TX ) );
308 else
309     maxDisp_TX = 1; % Para evitar divisão por zero
310 end
311
312 if size ( allCoords_RX ,1) > 1
313     maxDisp_RX = max ( pdist ( allCoords_RX ) );
314 else
315     maxDisp_RX = 1;
316 end
317
318 % Normalizar as dispersões médias
319 norm_disp_TX = avgDisp_TX / maxDisp_TX ;
320 norm_disp_RX = avgDisp_RX / maxDisp_RX ;
321
322 % Calcular o custo de escalabilidade como complemento da média
      das dispersões normalizadas
323 custoEscalabilidade = 1 - ( norm_disp_TX + norm_disp_RX ) / 2;
324 end
```

## ANEXO A – COEFICIENTES PARA O CÁLCULO DA ATENUAÇÃO PELA CHUVA.

Tabela 9 – Coeficientes para o cálculo da atenuação específica.

Frequência (GHz)	$ka_H$	$\alpha_H$	$ka_V$	$\alpha_V$
1	0.0000259	0.9691	0.0000308	0.8592
2	0.0000847	1.0664	0.0000574	0.8957
3	0.0001390	1.2322	0.0001942	1.0688
4	0.0001071	1.6009	0.0002461	1.2476
5	0.0002162	1.6969	0.0002428	1.5317
6	0.0007056	1.5900	0.0004878	1.5728
7	0.0019150	1.4810	0.0014250	1.4745
8	0.0041150	1.3905	0.003450	1.3797
9	0.0075350	1.3155	0.006691	1.2895
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
15	0.04481	1.1233	0.05008	1.0440
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
25	0.15710	0.9991	0.15330	0.9491
30	0.24030	0.9485	0.22910	0.9129
35	0.33740	0.9047	0.32240	0.8761
40	0.44310	0.8673	0.42740	0.8421
45	0.55210	0.8355	0.53750	0.8123
50	0.66000	0.8084	0.64720	0.7871

Fonte: Adaptado de Recomendação ITU-R P.838-3.

Tabela 10 – Coeficientes para  $ka_H$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35551	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Fonte: Adaptado de Recomendação ITU-R P.838-3.

Tabela 11 – Coeficientes para  $ka_V$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Fonte: Adaptado de Recomendação ITU-R P.838-3.

Tabela 12 – Coeficientes para  $\alpha_H$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,14318	1,18442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Fonte: Adaptado de Recomendação ITU-R P.838-3.

Tabela 13 – Coeficientes para  $\alpha_V$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Fonte: Adaptado de Recomendação ITU-R P.838-3.