



SAMUEL TERRA VIEIRA

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA COBERTURA DE REDES
MÓVEIS UTILIZANDO DIFERENTES MODELOS DE
PROPAGAÇÃO**

LAVRAS – MG

2021

SAMUEL TERRA VIEIRA

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA COBERTURA DE REDES MÓVEIS UTILIZANDO
DIFERENTES MODELOS DE PROPAGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação para obtenção do título de Mestre.

Profª. DSc. Renata Lopes Rosa (DCC/UFLA)
Orientadora

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodríguez (DCC/UFLA)
Coorientador

**LAVRAS – MG
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Vieira, Samuel Terra

Ferramenta para análise da cobertura de redes móveis utilizando diferentes modelos de propagação / Samuel Terra Vieira. – Lavras : UFLA, 2021.

87 p. : il.

Dissertação(Mestrado)–Universidade Federal de Lavras, 2021.

Orientadora: Profa. DSc. Renata Lopes Rosa (DCC/UFLA).

Bibliografia.

1. Antena. 2. Simulação. 3. Otimização. I. Rosa, Renata Lopes. II Rodríguez, Demóstenes Zegarra. III. Título.

SAMUEL TERRA VIEIRA

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA COBERTURA DE REDES MÓVEIS UTILIZANDO
DIFERENTES MODELOS DE PROPAGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de Julho de 2021.

Prof. DSc. Luiz Henrique Andrade Correia DCC/UFLA

Prof. DSc. Vitor Barbosa Souza DPI/UFV

Profª. DSc. Renata Lopes Rosa (DCC/UFLA)
Orientadora

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodríguez (DCC/UFLA)
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

*Aos meus pais, Edmar e Joelma, por sempre
acreditarem em mim e por terem abdicado de suas
vidas em prol das realizações e da felicidade de
seus filhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem Sua ajuda, direção e o Seu agir em minha vida, não teria capacidade e o empenho para chegar até aqui; por se fazer presente até nos momentos em que os desafios foram tão grandes quanto minha vontade, por me ter dotado de saúde, sabedoria e disposição para alcançar mais uma etapa em minha vida.

Agradeço aos meus pais que, com toda humildade e simplicidade, me ensinaram a ser uma pessoa decente, a respeitar e buscar meus sonhos de forma honesta e dentro do meu tempo, mesmo que seja com muito trabalho árduo.

Agradeço aos professores Demóstenes e Renata, a paciência e compreensão que teve comigo durante o período em que me acompanharam e que estivemos juntos realizando este trabalho. Estiveram sempre presentes como grandes professores, comprometidos em dar o melhor.

*"Machines take me by surprise with great frequency."
(Alan Turing)*

RESUMO

À medida que a tecnologia móvel cresce, novos desafios relacionados também vêm surgindo. Redes móveis trazem o benefício da praticidade e mobilidade ao nosso cotidiano, porém, estações rádio base (ERBs) com um raio de abrangência limitado do sinal, a qualidade de experiência do usuário é diretamente influenciada. Com esta restrição da área de cobertura, é interessante que as empresas busquem pontos estratégicos para a alocação ERBs, para que, possam atender ao maior número de clientes e ainda oferecer uma boa qualidade de serviço e experiência para os mesmos. O que comumente acontece é a não realização de um estudo detalhado da qualidade de sinal antes de realizarem a implantação de novas ERBs, resultando em locais sem cobertura de sinal e/ou até uma má qualidade do serviço. Nesse contexto, as ferramentas de planejamento de cobertura de rede têm um papel importante na determinação da localização e instalação de um transmissor de sinal. Na literatura atual, existem poucos trabalhos e ferramentas, que realizam uma sugestão de posicionamento de uma ERB juntamente com a análise do espectro de rádio frequência. Dessa forma, para ajudar a solucionar o problema e tornar fácil a estimativa do quão boa será a alocação da antena, é implementado uma ferramenta para a análise da cobertura do sinal considerando a telefonia móvel oferecida em uma determinada região, o estudo se realizou considerando a região de Lavras/MG. Além de realizar a simulação, a ferramenta proposta tem recursos para sugerir um melhor posicionamento das ERBs utilizando a meta-heurística *Simulated Annealing* para fins de otimização dos pontos de instalação. Para isto, são utilizados modelos de propagação disponíveis na literatura a fim de sugerir pontos estratégicos para a alocação das ERBs que garantam uma melhor cobertura, e conseqüentemente uma melhor qualidade de comunicações de telefonia. Com as simulação dos diferentes modelos de propagação, o modelo COST231-Hata se mostrou promissor, sugerindo novas localizações que prometem uma cobertura de até 17.4% a mais que a área coberta inicialmente, utilizando valores de potência e altura diferentes.

Palavras-chave: Antena. Simulação. Área de cobertura. Modelos de Propagação. Otimização. Meta-heurística. Simulated Annealing

ABSTRACT

As mobile technology grows, new related challenges are also emerging. Mobile networks bring the benefit of practicality and mobility to our daily lives, however, with base stations (BS) having limited range of signal, the quality of the user experience is directly and negatively influenced. With this coverage area restriction, it is interesting that companies seek strategic points for the allocation of BS, so that they can serve the largest number of customers and still offer a good quality of service and experience to them. What commonly happens is that a detailed study of the signal quality is not carried out before implementing new BS, resulting in places without signal coverage and/or even a poor quality of service. In this context, network coverage planning tools play an important role in determining the best location for the installation of a signal transmitter. In the current literature, there are few works and tools that suggest the positioning of an BS together with the analysis of the radio frequency spectrum. Thus, to help solve the problem and make it easy to estimate how good the antenna allocation will be, a tool for the analysis of signal coverage is implemented considering the mobile telephony offered in a given region, the study was carried out considering the region of Lavras/MG. In addition to performing the simulation, the proposed tool has resources to suggest a better positioning of the BS using the Simulated Annealing meta-heuristic for the purpose of optimizing the installation points. For this, propagation models available in the literature are used in order to suggest strategic points for the allocation of BS that ensure better coverage, and consequently a better quality of telephony communications. The simulations with different propagation models, the COST231-Hata model proved to be promising, suggesting new locations that promise a coverage of up to 17.4% more than the initially covered area, using different power and height values.

Keywords: Antenna. Simulation. Coverage Area. Propagation Models. Optimization. Metaheuristics. Simulated Annealing

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Arquitetura de rede celular	20
Figura 2.2 – Comportamento do <i>Simulated Annealing</i> durante a exploração do espaço de busca.	32
Figura 4.1 – Visão geral do fluxo de execução do algoritmo.	36
Figura 4.2 – Página web do Sistema MOSAICO.	38
Figura 4.3 – Fluxograma de execução do algoritmo <i>Simulated Annealing</i> sob o problema.	42
Figura 4.4 – Simples organização dos cenários na aplicação.	46
Figura 5.1 – Tela principal da ferramenta desenvolvida.	51
Figura 5.2 – Janela de obtenção das informações das ERBs do sistema MOSAICO.	53
Figura 5.3 – Tela principal da ferramenta contendo o resultado de uma simulação de RF.	54
Figura 5.4 – Atenuação do sinal propagado durante simulação utilizando <i>Free-space path loss</i>	55
Figura 5.5 – Potência do sinal recebido durante simulação utilizando <i>Free-space path loss</i>	56
Figura 5.6 – Mapa topográfico da região utilizada nas simulações.	57
Figura 5.7 – Propagação de sinais considerando a altura do terreno utilizando modelo de propagação COST231-Hata	57
Figura 5.8 – Valores da função objetivo durante execução.	58
Figura 5.9 – Representação do espaço de busca com áreas específicas.	60
Figura 5.10 – Relação da distância da ERB com a Estação Móvel.	61
Figura 5.11 – Propagação de sinais considerando altura ideal da antena.	62
Figura 5.12 – Resultado localização sugerida utilizando modelo COST231-Hata.	69
Figura 5.13 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo COST231-Hata.	69
Figura 5.14 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo COST231-Hata.	70
Figura 5.15 – Resultado localização sugerida utilizando modelo Hata Path Loss.	73
Figura 5.16 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo Hata Path Loss.	74
Figura 5.17 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo Hata Path Loss.	74
Figura 5.18 – Resultado localização sugerida utilizando modelo <i>Two-rays ground reflection</i>	77
Figura 5.19 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo <i>Two-rays ground reflection</i>	78
Figura 5.20 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo <i>Two-rays ground reflection</i>	78
Figura 5.21 – Área específica definida para benefício do sinal.	79

Figura 5.22 – Resultado localização sugerida utilizando modelo COST231-Hata considerando área específica.	81
Figura 5.23 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo COST231-Hata considerando área específica.	81
Figura 5.24 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo COST231-Hata considerando área específica.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para modelos de propagação.	55
Tabela 5.2 – Resultado obtido pela busca de alturas ideias utilizando COST231-Hata.	62
Tabela 5.3 – Resultado obtido pela busca de potências ideias utilizando COST231-Hata.	64
Tabela 5.4 – Parâmetros gerais do cenário.	65
Tabela 5.5 – Parâmetros da meta-heurística utilizada para a busca.	66
Tabela 5.6 – Resultados obtidos utilizando COST231-Hata.	67
Tabela 5.7 – Resultados obtidos utilizando COST231-Hata.	68
Tabela 5.8 – Resultados obtidos utilizando Hata Path Loss.	71
Tabela 5.9 – Parâmetros utilizados para busca utilizando Hata Path Loss.	72
Tabela 5.10 – Resultados obtidos utilizando <i>Two-rays ground reflection</i>	75
Tabela 5.11 – Parâmetros utilizados para <i>Two-rays ground reflection</i>	76
Tabela 5.12 – Resultados obtidos utilizando COST231-Hata em otimização considerando área específica.	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos gerais	15
1.2.1	Objetivos específicos	15
1.3	Organização do trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Sistema celular	17
2.2	Arquitetura da rede celular	19
2.3	Propagação de sinais de rádio	20
2.4	Modelos de propagação	21
2.4.1	Propagação no espaço livre (modelo de <i>Friis</i>)	22
2.4.2	Modelo de reflexão no solo em dois raios	22
2.4.3	Log-distance path loss	23
2.4.4	Modelo de perda no caminho por inclinação	24
2.4.5	Modelo empírico de Hata	24
2.4.6	Modelo COST231-Hata	26
2.4.7	Modelo COST 231-Walfisch-Ikegami	27
2.5	A Meta-heurística	30
2.5.1	Simulated Annealing	31
3	TRABALHOS RELACIONADOS	33
4	METODOLOGIA	36
4.1	Componentes e processos da ferramenta proposta	36
4.1.1	Primeira etapa	37
4.1.1.1	Base de dados da Anatel	37
4.1.2	Segunda etapa	39
4.1.2.1	Meta-heurística de otimização	39
4.1.2.2	Função objetivo e avaliação das soluções	41
4.1.2.3	Avaliação da cobertura de RF	42
4.1.3	Terceira etapa	43
4.1.3.1	Interface Gráfica	43
4.2	Descrição dos parâmetros do cenários de simulação	45
4.3	Representação do Ambiente	47

4.3.1	Open Street Map	47
4.3.2	Escala e precisão	48
4.4	Referência de elevação do terreno	49
5	TESTES E RESULTADOS	51
5.1	Funcionalidades da ferramenta proposta	51
5.1.1	Busca de informações de ERBs	52
5.1.2	Simulação da propagação de sinais de rádio	53
5.1.3	Buscando melhores pontos com a meta-heurística	56
5.1.4	Busca de solução vizinha	58
5.2	Definição de áreas específicas	59
5.3	Otimização dos parâmetros de altura e potência	60
5.3.1	Definição de alturas ideais	60
5.3.2	Definição de potências ideais	63
5.4	Resultados experimentais utilizando diferentes modelos de propagação	64
5.4.1	Resultados obtidos utilizando modelo COST231-Hata	66
5.4.2	Resultados obtidos utilizando modelo Hata Path Loss	71
5.4.3	Resultados obtidos utilizando modelo Two-rays ground reflection	75
5.4.4	Resultado de otimização considerando área específica utilizando modelo COST231-Hata	79
6	CONCLUSÕES	83
6.1	Contribuições e trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A telecomunicação móvel revolucionou o mundo moderno e a forma de se comunicar de milhões de pessoas em volta do globo. Toda essa evolução fez com que os provedores de redes de telecomunicações móveis buscassem cobrir a maior área possível em sua prestação de serviços. Desde sua introdução no final dos anos setenta, a comunicação móvel sem fio passou por estágios significativos de desenvolvimento, desde chamadas de voz analógicas até a mais recente tecnologia digital de ponta. Nos dias de hoje, os provedores de rede têm a opção de usar uma combinação de redes de segunda geração (2G), terceira geração (3G) e quarta geração (4G) para oferecer aos seus clientes (SCHMIDT-DUMONT; VUUREN, 2016).

Os primeiros sistemas de comunicação celular eram limitados à tecnologia da época. Inicialmente era possível trafegar apenas voz de forma analógica, o que já foi chamado de primeira geração (1G) (COSTA, 2016). Só com a chegada da segunda geração, tornou-se possível a comunicação móvel com sinais digitais e conseqüentemente, não só permitiu a transmissão de voz, mas também de dados. Com a terceira geração surge o melhoramento do que já havia na segunda geração e com uma melhora na velocidade de comunicação. A quarta geração traz para os usuários, o acesso à internet banda ultra larga, à realização de *streaming* de vídeo e a maior segurança no envio de pacotes. Hoje, a comunicação móvel celular encontra-se no início da sua quinta geração e, a partir da realização de novas pesquisas, está partindo para a sexta geração, permitindo que os usuários tenham maior largura de banda, menores latências e também uma melhor qualidade de experiência (SCHMIDT-DUMONT; VUUREN, 2016).

Com o surgimento de novas tecnologias de comunicação móvel, como vem acontecendo com a quinta geração, faz com que o crescente número de dispositivos móveis traga também um grande volume do tráfego de rede e um uso mais intenso da rede celular. O 5G representa velocidades de rede sem precedentes e uma boa experiência com relação à qualidade de serviço.

A tecnologia 5G tornou-se uma das principais preocupações das operadoras de telefonia móvel. Tal preocupação diz respeito às operadoras que enfrentam problemas como o de garantir a coexistência de diferentes tecnologias de acesso, constante inconsistência do serviço e falhas frequentes na entrega de pacotes.

Com novas tecnologias, o aumento da frequência de transmissão e as ondas milimétricas se tornando um obstáculo, o alcance de sinais tendem a diminuir e faz com que seja realizado a implantação de um número maior de transmissores em uma região (PANWAR; SHARMA; SINGH, 2016). Conseqüentemente, isso faz com que haja um aumento significativo de custos de implantação das ERBs.

Para simplificar a rede de voz e solucionar problemas, como descrito em Technologies (2020), empresas como a Huawei estão desenvolvendo soluções que convergem várias redes de voz e permite

que todos os tipos de assinantes (que utilizam tecnologias 2G, 3G, 4G ou 5G) acessem uma rede ágil e eficiente. Atualmente, essas soluções estão em fase de testes e prometem simplificar ao máximo suas redes de voz, melhorar a eficiência de O&M (Organização e Métodos, setor afim de buscar a eficiência e a eficácia da estrutura administrativa) e acelerar a inovação de serviços, obtendo serviços de voz 5G de alta qualidade (TECHNOLOGIES, 2020).

A cobertura do sinal que abrange a área em volta da estação rádio base (ERB) é um fator que atinge significadamente a qualidade e usabilidade de clientes móveis. A localização de ERBs é de suma importância para o desempenho das redes de rádio celular, ainda mais na fase de planejamento de uma rede que, quando possível, deve haver uma ferramenta automatizada disponível que irá sugerir a localização ideal das estações base e as configurações correspondentes em termos de potência de transmissão, altura da antena e direção do feixe da antena (MATHAR; NIESSEN, 2000).

A fim de prever casos onde a área de cobertura não abrange o necessário para uma qualidade significativa para a usabilidade dos clientes, neste trabalho também são utilizadas estratégias e otimização de posicionamento das ERBs. Para resolver essas questões, se torna imprescindível a simulação da propagação de sinais utilizando modelos de propagação específicos para ambientes externos. No que se diz respeito à otimização das ERBs, fazer o uso de uma meta-heurística como o *Simulated Annealing* (SA) como técnica de busca local, faz com que soluções plausíveis sejam encontradas.

Neste contexto, a principal contribuição deste trabalho é utilizar modelos de propagação em ambientes externos presentes na literatura, para o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de realizar simulações da cobertura de sinais de rádio de ERBs de operadoras de telefonia móvel de acordo com suas características como frequência, alturas, potência de transmissão, localização geográfica e demais características específicas da antena.

Para um cenário realista, são utilizados as especificações de ERBs reais implantadas no território brasileiro e homologadas pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações). Dentre as características das antenas pode-se citar: número da estação, endereço, estado, município, frequência inicial e final, tipo da antena, elevação, polarização, altura da antena em metros, potência de transmissão em Watts, coordenadas geográficas dentre outras informações.

O objetivo é demonstrar que tecnologias de comunicação celular, possuem peculiaridades que devem ser analisadas e tratadas. Dentre esses aspectos, os resultados nos lavaram a pontos específicos para um bom planejamento da implantação de novas antenas celulares considerando tecnologias anteriores à quinta geração.

Além disso, todas as questões tratadas sobre implementações científicas deste trabalho, estão presentes na ferramenta desenvolvida contendo uma interface que é de fácil manipulação e amigável

para que provedores possam realizar melhor um bom planejamento de novas instalações de ERBs, assim como um novo remanejamento das já existentes. Vale ressaltar que a ferramenta não considera demais ERBs já instaladas na região durante o cálculo do melhor posicionamento de uma nova instalação.

1.1 Motivação

Com o surgimento de novas tecnologias, a demanda por ERBs a fim de otimizar o sinal de cobertura deve aumentar, isso faz com que se torne um desafio para as empresas de telefonia. Redes de quinta geração por exemplo, trazem o benefício de ter uma alta vazão dos dados, porém, ERBs 5G têm um raio de abrangência menor e, conseqüentemente, têm uma área de cobertura menor se comparada às tecnologias antecessoras. A área de cobertura mais limitada faz com que as empresas busquem pontos estratégicos para alocarem suas ERBs, para que, possam atender ao maior número de clientes e ainda oferecer uma boa qualidade de serviço e experiência para os mesmos.

É necessário ressaltar a validade prática do projeto desenvolvido, onde o estudo ajuda a complementar o planejamento para a localização de implantação de ERBs. O trabalho considera diferentes parâmetros durante a instalação, como uma altura de instalação ou potência de transmissão, que podem afetar diretamente na degradação rápida do sinal até o receptor. Como consequência, o serviço de comunicação de voz pode ser diretamente afetado, e em alguns casos, pode levar à má qualidade de experiência dos usuários.

Um outro problema acontece geralmente em grandes empresas de telefonia, é que comumente não é realizado um estudo detalhando antes de realizarem a implantação de novas ERBs. Geralmente, essa questão passa despercebida ou até algumas vezes pode ser ignorada pelo fato do não conhecimento do risco de uma má escolha do local de implantação de uma estação, resultando em locais sem cobertura de sinal e/ou até uma má qualidade do serviço.

Ademais, o sinal que é propagado por cada ERB pode sofrer interferências que fazem com que o sinal chegue degradado até às estações móveis, tais como, sinais com intensidade alta que estejam com frequência próxima, obstáculos que se encontram entre a estação transmissora e estação receptora, e a própria degradação do sinal. Uma técnica que ajuda a solucionar este problema é a detecção do nível dos sinais e/ou interferências no determinado local por meio de uma análise do espectro de rádio frequência (RF). Um problema que é facilmente observável e que pode levar à baixa qualidade do serviço é a existência de pontos cegos e zonas onde o sinal chega com uma potência muito baixa.

Por fim, até a data de desenvolvimento deste trabalho, não há disponível qualquer ferramenta livre, gratuita e de código-fonte aberto que realize a simulação do espectro de rádio frequência que considere a cobertura do sinal juntamente parâmetros de ERBs reais homologadas à Anatel e que busque

otimizar as suas posições de instalação. Foram encontradas apenas algumas soluções proprietárias, comerciais e estudos científicos que não consideram um nível de detalhe como o utilizado neste trabalho.

1.2 Objetivos gerais

O objetivo principal desse projeto é a implementação de uma ferramenta de simulação utilizando meta-heurística para o planejamento de implantação de estações rádio base de telefonia móvel, considerando uma área de cobertura específica. A ferramenta deve utilizar diferentes modelos de propagação, considerar alturas, potência e frequência de transmissão de ERBs reais e, no final, fornecer informações de forma simples e clara ao usuário que sirvam para tomada de decisão de uma nova instalação. Destaca-se que, estas, de uma forma geral, são as principais contribuições do trabalho. A fim de apresentação e estudos de caso, o trabalho se aplicou com foco na região de Lavras/MG mas podendo se expandir para qualquer região do território brasileiro.

1.2.1 Objetivos específicos

Cabe aos objetivos específicos deste projeto:

- analisar e implementar diferentes modelos de propagação;
- buscar e extrair informações de ERBs na base de dados da Anatel;
- implementar visualizador da propagação de sinais;
- implementar a meta-heurística *Simulated Annealing* para a sugestão de alocação das estações rádio base;
- adaptar a meta-heurística para considerar alturas e potências diferentes no espaço de busca durante a simulação;
- adaptar a meta-heurística para priorizar áreas específicas;
- analisar o impacto dos parâmetros de configuração das ERBs;
- desenvolver uma ferramenta *open-source* com recursos gráficos, contendo as implementações realizadas no desenvolvimento do trabalho;
- apresentar as análises das simulações com interface gráfica de forma clara e objetiva ao usuário a fim de tomadas de decisões.

1.3 Organização do trabalho

Este documento é composto por este capítulo introdutório e por outros 5 capítulos, sendo eles:

Capítulo 2, aborda os principais conceitos necessários ao projeto, como modelos de propagação de sinais, meta-heurísticas, estudos e conceitos sobre tecnologias de telefonia móvel.

Capítulo 3, apresenta as conclusões da revisão sistemática do estado da arte em buscar o melhor posicionamento das estações rádio base em determinada região.

Capítulo 4 expõe a metodologia de pesquisa utilizada durante o desenvolvimento do projeto.

Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos na fase final do desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho, contribuições da pesquisa e trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais para o desenvolvimento do projeto, este material foi organizado durante a fase de pesquisa bibliográfica. O capítulo apresenta, conceitos sobre as tecnologias móveis na Seção 2.1, conceitos relacionados à arquitetura de rede celular na Seção 2.2, conceitos básicos relacionados à propagação de sinais de rádio são apresentados na Seção 2.3, fundamentos sobre modelos de propagação de sinais na Seção 2.4. E por fim, na Seção 2.5 são apresentados os conceitos sobre a meta-heurística e a sua importância para a busca da otimização da cobertura do sinal de rádio.

2.1 Sistema celular

Um geração de tecnologia móvel geralmente se refere em a mudança na natureza fundamental do serviço, na tecnologia de transmissão não compatível com versões anteriores e até nas novas faixas de frequência utilizadas. Desde 1981, com a rede analógica, cerca de a cada dez anos surge uma nova geração, então, a fim de apresentar as principais mudanças e a evolução das tecnologias, nesta seção serão discorridos as gerações de tecnologia móveis presentes até a data de desenvolvimento deste trabalho.

A primeira geração de sistemas móveis teve início no fim do ano de 1979, utilizando transmissão analógica no serviço de voz (SHARMA, 2013). Apenas em meados dos anos 1980, foi utilizado serviços de voz baseado em uma tecnologia denominada AMPS (*Advanced Mobile Phone*) (VORA, 2015). Tal serviço era modulado por frequência e utilizava acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA) com um canal com capacidade de 30KHz e frequência de banda na faixa de 824 a 894 MHz. Além de todo o serviço ser oferecido de forma analógica, possuía a má qualidade de voz, grande consumo de energia para o funcionamento e sua capacidade de transmissão era limitada.

A segunda geração, ou apenas 2G, é baseada em GSM (*Global System for Mobile Communications*, originalmente sendo *Groupe Spécial Mobile*) e surgiu ao final dos anos 1980 e já utilizava sinais digitais para a transmissão de voz. Inicialmente, o principal foco da tecnologia era fornecer um serviço que realizasse a entrega de mensagens de texto e imagem em uma velocidade baixa, com uma largura de banda de 30 a 200 KHz (AGARWAL et al., 2019). Adjacente ao 2G, com sistema 2.5G houve um aperfeiçoamento contínuo na tecnologia GSM, utilizando comutação por pacotes e por circuitos e oferecendo dados de até 144 kbps, como por exemplo GPRS, CDMA, EDGE (VORA, 2015).

O 3G, foi como ficou conhecida a terceira geração de redes celulares, teve início em 2000 com o objetivo de oferecer dados em alta velocidade. Opera em uma faixas de 2100 MHz e possui uma largura

de banda de 15 a 20 MHz sendo usada para serviços de internet de alta velocidade, como chamadas de vídeo.

Os padrões para o desenvolvimento das redes anteriores a terceira geração, eram diferentes para diferentes partes do mundo. Por isso, decidiu-se ter uma rede que forneça serviços independentemente da plataforma de tecnologia e cujos padrões de projeto de rede sejam os mesmos globalmente. Com isso, a 3G não é um padrão, mas sim, uma família de padrões em que todos podem trabalhar juntos (SHARMA, 2013).

Redes 3G permitem que as operadoras de rede ofereçam aos usuários uma gama mais ampla de serviços mais avançados e, ao mesmo tempo, obtenham maior capacidade de rede por meio de maior eficiência espectral.

A terceira geração foi chamada de UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) na Europa, enquanto CDMA2000 é o nome da variante 3G americana.

A quarta geração, ou apenas 4G, teve início no ano de 2010. Foi realizado seu primeiro teste bem sucedido em Junho de 2015 na cidade de Tóquio, no Japão. Os testes foram realizados com êxito realizando a transmissão em tempo real de 1 Gigabit por segundo de *downlink* a uma velocidade de movimento por volta de 20 km/h (SHARMA, 2013).

O 4G oferece recursos semelhantes ao 3G e fornece também serviços adicionais, como o acesso à internet banda ultra larga tornando capaz de prover de 10 Mbps a 1 Gbps, a alta qualidade de *streaming* de vídeo, a maior segurança no envio de pacotes (VORA, 2015). Todo o avanço entre as gerações se deu à constante evolução de tecnologias e ao melhor aproveitamento das frequências de transmissão e potência.

O 5G é o que se refere à quinta geração de redes de celular, que teve início ao seu desenvolvimento no final do ano de 2010. As aplicações que podem ser vistas com esta tecnologia incluem a melhoria nos níveis de conectividade, com foco principalmente na *World Wide Web* (WWW) sem fio (VORA, 2015).

À medida que a quinta geração (5G) é desenvolvida e implementada, acredita-se que as principais diferenças em relação ao 4G serão o uso de alocações de espectro muito maiores em bandas de frequência de comprimento de onda milimétricas, antenas de direção de feixe altamente direcionais com transmissão *Beamforming* entre o dispositivo móvel e a estação base, maior duração da bateria, menor probabilidade de interrupção, taxas de bits muito maiores em partes maiores da área de cobertura, custos de infraestrutura mais baixos e maior capacidade agregada para muitos usuários simultâneos no espectro licenciado e não licenciado (por exemplo, a convergência de *Wi-Fi* e celular) (RAPPAPORT et al., 2013). As redes *backbone* da 5G passarão de conexões sem fio de cobre e fibra, para ondas milimétricas,

permitindo rápida implantação e conectividade em malha com a cooperação entre estações base (SAH et al., 2019).

Segundo Aryanti e Haryadi (2017), em um futuro próximo deve existir um aumento significativo na demanda de redes 5G (aproximadamente um fator de 10.000 vezes). Tal fato deve ser alcançado a partir do fim de 2021 e deve buscar uma taxa de dados mais aprimoradas, a latência reduzida e cada vez mais a melhor qualidade de serviço. Com o 5G influenciando diretamente no crescimento do tráfego de dados sem fio, é um esperado que haja um crescimento exponencial na frequência do espectro existente, isso pois o mesmo é um recurso limitado e pode não ser suficiente para atender tecnologias com alta largura de banda.

2.2 Arquitetura da rede celular

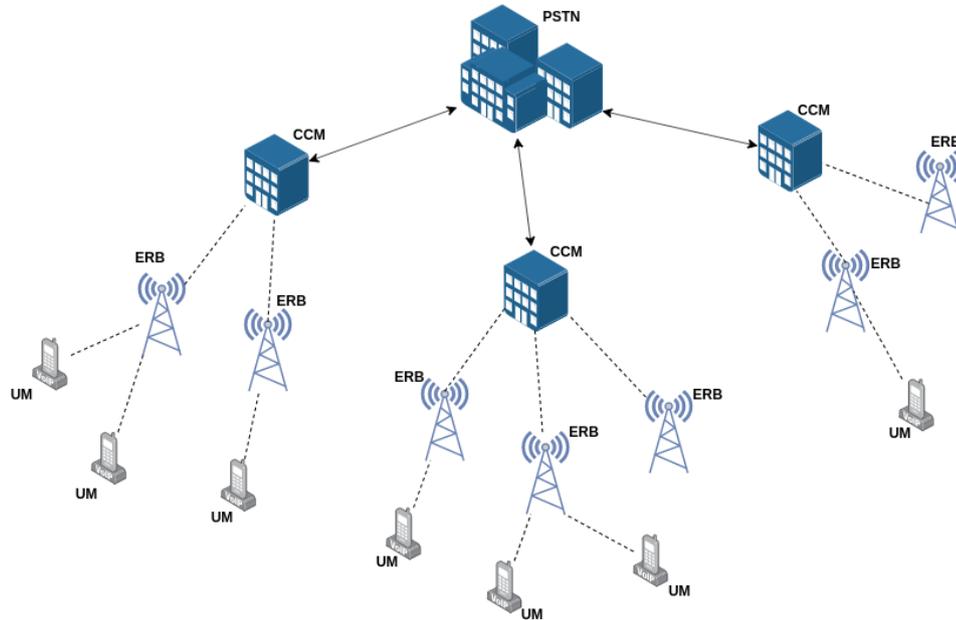
Figueiredo (2004) e Rochol (2018) definem as entidades envolvidas em um sistema típico celular como sendo:

- **Estação rádio base (ERB):** a unidade presente no centro de cada célula, sendo responsável pela cobertura de sua área de abrangência. É composta basicamente por unidades transmissoras e receptoras;
- **Centro de controle móvel (CCM):** grupos de células são interconectadas e controladas por um centro de controle. Assim, o enlace a ser estabelecido entre as ERBs e o CCM pode ser feito por fibras ou por rádio-frequência;
- **Unidades móveis (UM) ou Estações móveis (EM):** estas entidades são os terminais dos usuários, telefones celulares por exemplo;
- **Rede de telefonia pública comutada (RTPC ou PSTN):** o CCM se comunica com o RTPC, o que torna possível a comunicação entre dois celulares, localizados em áreas diferentes, ou até mesmo, entre um fixo e um celular, que estejam na mesma área de abrangência.

Na Figura 2.1 é possível ver como é organizado o esquema da arquitetura celular descrita anteriormente.

Dentro da arquitetura da rede celular, Rochol (2018) ressalta que uma das atividades mais importantes no plano de sinalização e controle é a chamada gerência da mobilidade de uma conexão. Existem dois níveis de gerenciamento de mobilidade de um usuário, é o chamado processo de *handoff*, que é correspondente ao deslocamento da estação móvel entre duas células (usuário em movimento sai da área de cobertura de uma antena e passa para outra) adjacentes e pode ser realizado de duas formas:

Figura 2.1 – Arquitetura de rede celular



Fonte: Do autor (2021).

- *Hard-handoff*: quando acontece a interrupção momentânea da conexão, ou
- *Soft-handoff*: quando não acontece a interrupção da conexão.

A mudança entre dois domínios de células (migração de uma CCM para outra) distintos, é intitulada como *roaming*. Isso corresponde à mobilidade do usuário entre domínios celulares distintos. Acontece entre uma cidade e outra ou de um país para outro. Na subseção a seguir trataremos sobre os conceitos relacionados à propagação de sinais.

2.3 Propagação de sinais de rádio

O sinal produzido pela estação rádio base nada mais é, de um modo simplista, que uma onda de rádio que se propaga no espaço. De acordo com Rappaport (2009),

Os mecanismos por trás da propagação da onda eletromagnética são diversos, mas geralmente podem ser atribuídos a reflexão, difração e dispersão. [...] Devido a múltiplas reflexões de vários objetos, as ondas eletromagnéticas trafegam por diferentes caminhos de tamanhos variados. A interação entre essas ondas causa uma distorção de caminhos múltiplos em um local específico, e a intensidade das ondas diminui à medida que a distância entre transmissor e receptor aumenta. (RAPPAPORT, 2009, p. 72)

Rappaport (2009) descreve três modelos básicos de propagação que são usados para a previsão da intensidade do sinal recebido a determinada distância do transmissor, numa larga escala.

O modelo de propagação no espaço livre (*Friis*) é utilizado quando transmissor e receptor possuem uma linha de visão desobstruída, ou seja, não há obstáculos entre eles que interrompam ou alterem o caminho da transmissão do sinal. O modelo de propagação no espaço livre oferece uma noção da ordem de magnitude do sinal recebido, mas é demasiado otimista pois raramente há um único caminho entre a antena transmissora e a antena receptora: em situações reais, haverá reflexão do sinal no solo. Para grandes distâncias e antenas altas, o modelo de reflexão no solo é razoavelmente preciso para prever a intensidade do sinal recebido. Esse modelo é baseado na ótica geométrica e considera o caminho direto e o caminho refletido (modelo de dois raios), que muitas vezes é no solo.

E, por fim, tem-se o modelo de difração (por gume de faca) que torna possível propagar os sinais de rádio através de obstruções, bem como ao redor da superfície da terra, além do horizonte. Contudo, a força do campo recebido diminui rapidamente quando o receptor se aproxima do obstáculo em direção à região obstruída (sombra), porém, o campo de difração ainda existe e normalmente tem força suficiente para produzir um sinal útil (RAPPAPORT, 2009, p. 72-83).

No sistema de comunicação móvel, a transmissão de rádio geralmente ocorre em terrenos descontínuos. O perfil do terreno pode variar de um perfil simples de terra curva a um perfil altamente montanhoso (NASEEM; NAUSHEEN; MIRZA, 2018). A presença de árvores, prédios e outros obstáculos também devem ser levados em consideração e são fatores importantes na propagação de sinais. Vários modelos de propagação estão disponíveis para prever a perda de caminho em terrenos irregulares. Alguns modelos de propagação ao ar livre comumente usados são agora discutidos. Com isso, na próxima seção são apresentados os modelos de propagação que serviram como base da simulação da propagação de sinais.

2.4 Modelos de propagação

Quando se deseja analisar a propagação do espectro de rádio frequência, é indispensável o conhecimento do meio de transmissão e qual modelo se deve usar para obter um resultado mais realista (RAUCH et al., 2015). Para tal análise, o meio de propagação utilizado é o canal de rádio.

Então, se faz necessário uma escolha consciente de quais modelos de propagação devem ser utilizados quando se quer obter uma boa representação da propagação de sinais e que ao mesmo tempo esteja condizente com a realidade (VIEIRA et al., 2019). Quanto maior for a precisão desejada, mais detalhes sobre o ambiente de propagação devem ser modelados. Nesta subseção são apresentados, de forma breve, alguns modelos que foram estudados para a realização deste trabalho.

2.4.1 Propagação no espaço livre (modelo de Friis)

O modelo *Friis free-space path loss* ou geralmente tratado como modelo de propagação no espaço livre de *Friis* é usado para prever a intensidade do sinal recebido quando a antena transmissora e a antena receptora possuem um caminho de linha de visão limpo, ou seja, um caminho desobstruído de qualquer objeto ou edificação (LUO, 2013). A potência recebida através do espaço livre pela antena receptora separada da antena transmissora por uma distância d pode ser calculada pela Equação 2.1.

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

Sendo as variáveis da equação:

- d é a distância de separação das antenas em metros;
- P_t a potência transmitida em decibel miliwatt (dBm);
- $P_r(d)$ a potência recebida em dBm na distância d ;
- G_t é o ganho da antena transmissora em decibéis (dBi);
- G_r é o ganho da antena receptora em decibéis (dBi);
- L é o fator de perda ($L \geq 1$), $L = 1$ indica nenhuma perda no *hardware* do sistema;
- λ é o comprimento de onda dado em metros.

Tal modelo é em geral usado em sistemas de comunicação por satélite e em enlaces de rádio de microondas com linha de visão. Assim como os modelos outdoor, o modelo de propagação no espaço livre de *Friis*, pressupõe que a potência recebida diminui com uma função da distância entre a antena transmissora e a antena receptora elevada a alguma potência, ou seja, uma função da lei de potência.

2.4.2 Modelo de reflexão no solo em dois raios

O modelo de reflexão no solo em dois raios ou *Two-rays ground reflection*, é um modelo de propagação de rádio que prevê as perdas de trajetória entre uma antena transmissora e uma antena receptora. Em geral, as duas antenas têm altura diferente e dificilmente possuem uma linha direta (LUO, 2013). O sinal é recebido de duas formas: por LOS (linha de visão) e o por *multipath* (multicaminho) formado predominantemente por uma única onda refletida no solo.

A potência recebida a uma determinada distância do transmissor para o modelo *Two-rays ground reflection model* pode ser expressa na Equação 2.2.

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2.2)$$

Sendo as variáveis da equação:

- d a distância em metros do receptor ao transmissor;
- $P_r(d)$ a potência recebida com distância d ;
- P_t a potência transmitida;
- G_r o ganho da antena receptora;
- G_t o ganho da antena transmissora;
- h_t a altura da antena transmissora em metros;
- h_r a altura da antena receptora em metros.

Para a Equação 2.2, pode-se notar que a potência recebida e a perda no caminho se tornam independentes da frequência (RAPPAPORT, 2009). O modelo de reflexão de dois raios é uma formulação matemática de um tipo de interferência *multipath* quando a interferência é considerada como consistindo em dois caminhos sendo (I) do transmissor ao receptor diretamente e (II) do transmissor, refletido no solo, para o receptor.

2.4.3 Log-distance path loss

O modelo *Log distance path loss* é um modelo genérico e uma extensão do modelo de espaço livre de *Friis*. Ele é usado para prever a perda de propagação para uma ampla gama de ambientes, enquanto que o modelo *Friis* é restrito ao caminho desobstruído entre o transmissor e o receptor (LUO, 2013).

O principal critério ou característica deste modelo é considerar que a perda no caminho é logaritmicamente dependente da distância. A perda no caminho (PL) é calculada com uma distância d entre um transmissor e receptor (geralmente dado em quilômetros). Na região mais distante do transmissor, se $PL(d_0)$ é a perda de percurso medida em dB a uma distância d_0 do transmissor, então a perda do caminho (a perda na potência do sinal em dB quando se desloca de distância d_0 a d) a uma distância arbitrária $d > d_0$ é dada pela Equação 2.3.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d_0}{d}\right) \quad (2.3)$$

Sendo as variáveis da equação:

- d é a distância dada em quilômetros;
- d_0 é a distância inicial de referência;
- $PL(d)$ é a perda no caminho para a distância d ;
- $PL(d_0)$ é um valor de perda de caminho para uma distância de referência;
- n é o expoente de propagação e indica a taxa na qual a perda de caminho aumenta com a distância (VISWANATHAN, 2013).

2.4.4 Modelo de perda no caminho por inclinação

O modelo de perda no caminho por inclinação ou *One-slope*, é classificado como sendo um modelo empírico e assume que a perda no caminho dada em *dBm* decai linearmente com a distância expressa em escala logarítmica, para uma distância d entre o transmissor e receptor (LUO, 2013). A equação que define o modelo *One-slop* pode ser visto na Equação 2.4.

$$PL(d) = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log(d) \quad (2.4)$$

Sendo suas variáveis da equação:

- d é a distância entre transmissor e receptor;
- $PL(d)$ é a perda no caminho para a distância d ;
- L_0 é a perda no caminho calculado em uma distância de referência (e.g., 1 metro);
- n é o expoente de perda no caminho.

O modelo se baseia na perda do espaço livre e visa incluir todas as perdas devido a vários mecanismos de propagação pelo caminho usando um expoente n de perda.

2.4.5 Modelo empírico de Hata

Este modelo foi implementado por Okumura de forma empírica na cidade de Tóquio no Japão, servindo como padrão para planejamento de sistemas móveis terrestres na qual posteriormente realizou novas derivações do seu estudo através de novas coletas (SILVA, 2004). O modelo possui três equações

modeladas conforme o cenário, podendo ser urbano, suburbano e rural ou área aberta. O valor da perda pelo caminho para aplicação no cenário urbano, pode ser obtido pela Equação 2.5.

$$PL_{Hata}^U = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{bs} - a(h_{ms}) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{bs}) \log_{10} d \quad (2.5)$$

Sendo as variáveis da equação:

- PL_{Hata}^U a perda no caminho dado por Hata no cenário urbano;
- f_c a frequência da portadora dada em MHz;
- h_{bs} a altura da estação base em metros;
- h_{ms} a altura da estação móvel em metros;
- d a distância entre o transmissor e receptor;
- $a(h_{ms})$ é um fator de correção dependente do terreno, que para cidades de pequeno e médio porte vem a ser demonstrado na Equação 2.6 e para cidades de grande porte na Equação 2.7;

$$a(h_{ms}) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) h_{ms} - 1.56 \log_{10}(f_c) + 0.8 \quad (2.6)$$

$$a(h_{ms}) = \begin{cases} 8.29(\log_{10}(1.54h_{ms}))^2 - 1, 10, & f_c \leq 200MHz \\ 3.2(\log_{10}(11.75h_{ms})) - 4, 97, & f_c \geq 400MHz \end{cases} \quad (2.7)$$

A equação para aplicação no cenário suburbano é dada pela Equação 2.8.

$$PL_{Hata}^S = PL_{Hata}^U - 2(\log_{10}(f_c/28))^2 - 5.4 \quad (2.8)$$

Sendo

- PL_{Hata}^S a perda no caminho dado por Hata no cenário suburbano;

- PL_{Hata}^U a perda no caminho dado por Hata no cenário urbano previamente calculado;
- f_c a frequência da portadora dada em MHz;

E por fim, a equação para aplicação no cenário rural ou área aberta pode ser visto na Equação 2.9.

$$PL_{Hata}^R = PL_{Hata}^U - 4.78(\log_{10}f_c) + 18.33\log_{10}f_c - 40.94 \quad (2.9)$$

Com as variáveis da equação sendo

- PL_{Hata}^R a perda no caminho dado por Hata no cenário rural ou área aberta;
- PL_{Hata}^U a perda no caminho dado por Hata no cenário urbano previamente calculado;
- f_c a frequência da portadora dada em MHz;

O erro de predição está na faixa de $1dB$, sendo independente da distância e constante para cada frequência (SILVA, 2004). É importante ressaltar que o modelo empírico de Hata ainda fica restrito a alguns parâmetros, tais como:

- f_c na faixa de 150MHz a 1500MHz;
- h_{bs} na faixa de 30m a 200m;
- h_{ms} na faixa de 1m a 10m;
- d de 1km a 20km.

O modelo ainda possui algumas limitações como na frequência máxima permitida, pois os sistemas celulares atuais utilizam frequência de propagação entre 1,8GHz e 2,0 GHz e a altura da estação base deve ser superior à altura média dos edifícios vizinhos (MOGENSEN et al., 1991).

2.4.6 Modelo COST231-Hata

O modelo COST231-Hata é uma extensão do modelo apresentado na Seção 2.4.5, porém, este modelo trabalha com frequências na faixa de 1,500MHz a 2,000MHz (SILVA, 2004). Assim, a perda pelo caminho dada pelo modelo pode ser vista na Equação 2.10

$$PL_{Hata} = A + B \log_{10}(d) + C_m \quad (2.10)$$

Onde A , B e C_m são definidas pelas Equações 2.11, 2.12 e 2.13 respectivamente.

$$A = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{bs}) - a(h_{ms}) \quad (2.11)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{bs}) \quad (2.12)$$

$$C_m = \begin{cases} 0 & \text{utilizado para cidades de médio porte e com área moderada de árvores;} \\ 3 & \text{para centro metropolitanos;} \end{cases} \quad (2.13)$$

Ambas as Equações 2.11 e 2.12 utilizam o valor de $a(h_{ms})$ definido pela Equação 2.6.

2.4.7 Modelo COST 231-Walfisch-Ikegami

O modelo COST 231 Walfisch-Ikegami é uma evolução do modelo de propagação de Ikegami. Foi desenvolvido para estimativa áreas urbanas e leva em consideração a obstrução da altura da construção e da largura da rua, bem como outros fatores relacionados ao ambiente urbano (ALQUDAH, 2013). O modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami considera três componentes básicos de atenuação do sinal, sendo eles:

- a perda no espaço livre;
- a perda por difração e espalhamento do sinal pelo telhado para a rua;
- e a perda devido à difração por multi-caminho.

Durante do desenvolvimento do projeto COST, foi sugerido que realizasse a combinação entre o método de Walfisch-Ikegami com o modelo de Ikegami. Tal sugestão teve o intuito de melhorar a estimativa da perda de percurso mediante a adição de mais informações (IKEGAMI et al., 1984; PARSONS, 2001). Destas informações, quatro fatores são considerados, sendo eles:

- a altura das edificações;
- a largura das ruas;
- a distância entre as edificações;
- e a orientação da rua com relação a linha de visada.

Este modelo possui cálculos específicos para percursos que possuem linha de visada (LOS) e sem a linha de visada (NLOS). Caso o percurso entre a ERB e a estação móvel tenha visibilidade, se tem uma expressão que se obtém o valor próximo da atenuação do sinal no espaço livre. Tal expressão se dá pela Equação 2.14 (PARSONS, 2001).

$$L_{50}(dB) = 42,6 + 26\log d + 20\log f \quad (d \geq 20m) \quad (2.14)$$

Para os caso onde não há linha de visada, a atenuação da propagação de sinais é calculada seguindo três passos (REIS, 2018), sendo eles:

1. cálculo da atenuação pelo espaço livre;
2. cálculo da propagação de sinais sobre o topo dos prédios;
3. cálculo da difração na quina dos prédios.

Com base nas considerações ditas, a equação que define então a atenuação do sinal propagado é dada pela Equação 2.15.

$$L_{50}(dB) = L_0(dB) + L_1(dB) + L_2(dB) \quad (2.15)$$

Na Equação 2.15 temos L_0 sendo a atenuação do sinal no espaço livre e L_1 e L_2 sendo contribuições vindas da difração associada à propagação de sinais na área urbana.

A Equação 2.16 mostra como é determinado o valor de L_1 , onde a mesma é baseada no princípio dado pelo modelo Ikegami. A Equação 2.16 considera um valor de ϕ como sendo o ângulo formado pelo eixo da rua entre a ERB e a estação móvel.

$$L_1(dB) = -16,9 - 10\log w + 10\log f + 20\log(H_B - h_m) + L_{11}(\phi) \quad (2.16)$$

Com a Equação 2.17, é definido qual o valor que L_{11} deve tomar de acordo com a angulação dada entre o raio incidente de transmissão e a rua.

$$L_{11} = \begin{cases} -10 + 0,354\phi & 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\phi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4,0 + 0,114(\phi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (2.17)$$

onde:

- w : é a largura da rua em metros onde se encontra a estação móvel;
- H_B : é a altura média em metros dos prédios onde é processado a difração nas vizinhanças da estação móvel
- h_m : é a altura da antena em metros da estação móvel;
- ϕ : é o ângulo formado pelo eixo da rua com a linha que liga a ERB com a estação móvel.

Em seguida, é necessário realizar o cálculo para a estimativa de atenuação vinda pela difração nas quinas dos prédios. O projeto COST 231 se estendeu para casos quando a antena está localizada abaixo dos telhados, utilizando uma função empírica seguindo medições reais (REIS, 2018). Sendo então, as seguintes equações citadas em Reis (2018) e a serem consideradas:

$$L_2(dB) = L_{21} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (2.18)$$

onde:

$$L_{21} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_b - H_B)] & h_b > H_B \\ 0 & h_b \leq H_B \end{cases} \quad (2.19)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_b > H_B \\ 54 - 0,8(h_b - H_B) & h_b \leq H_B \text{ e } d \geq 0,5 \text{ km} \\ 54 - 0,8(h_b - H_B) \frac{d}{0,5} & h_b \leq H_B \text{ e } d < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_b > H_B \\ 18 - 15 \frac{(h_b > H_B)}{H_B} & h_b \leq H_B \end{cases} \quad (2.21)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7\left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{para cidades médias e centros suburbanos} \\ 1,5\left(\frac{f}{925} - 1\right) & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (2.22)$$

O valor de k_a representa o incremento na perda de percurso quando a ERB está localizada abaixo da altura dos telhados. Os valores de k_d e k_f se dão respectivamente pela dependência da difração relacionados à distância e à frequência. Caso não se tenha os valores definidos para o ambiente, os seguintes valores são recomendados:

$$h = 3m \times \text{número de andares} + \text{altura da cobertura}$$

$$\text{altura do telhado} = \begin{cases} 3m & \text{para telhados inclinados} \\ 0m & \text{para telhados planos} \end{cases} \quad (2.23)$$

- $b = 20$ a $50m$;
- $w = \frac{b}{2}$;
- $\phi = 90^\circ$.

O modelo COST deve seguir as restrições de parâmetros de entrada, sendo eles:

- $800 \leq f \leq 2000$ (f em MHz);
- $4 \leq h_b \leq 50$ (h_b em metros);
- $1 \leq h_m \leq 3$ (h_m em metros);
- $0,02 \leq d \leq 5$ (d em quilômetros).

2.5 A Meta-heurística

No contexto de otimização e busca de soluções utilizando recursos computacionais, vários métodos são utilizados na literatura para otimizar o posicionamento de ERBs. Desses métodos, podemos

dar como exemplo: programação linear inteira (MATHAR; NIESSEN, 2000), algoritmo evolucionário (ZIMMERMANN; HöNS; MÜHLENBEIN, 2003), meta-heurísticas BRKGA (AMORIM et al., 2019) e algoritmos genéticos tais como o proposto por (HAN et al., 2001). Abordagens que utilizam algoritmos genéticos são bastante utilizadas nesse tipo de problema em que se quer otimizar o posicionamento e o número de células em um local.

Meta-heurísticas, em sua definição geral, são métodos heurísticos utilizados para resolver de uma forma genérica, problemas de otimização utilizando estratégias capazes de escapar dos ótimos locais e realizar uma pesquisa robusta de um espaço de solução (GENDREAU; POTVIN et al., 2010). Métodos heurísticos utilizam técnicas destinadas a resolver um problema mais rapidamente quando os métodos clássicos são muito lentos, ou senão, para encontrar uma solução aproximada quando os métodos clássicos não conseguem encontrar soluções exatas.

Neste trabalho é utilizada a meta-heurística *Simulated Annealing* para alcançar os objetivos propostos e a mesma é descrita na subseção seguinte.

2.5.1 Simulated Annealing

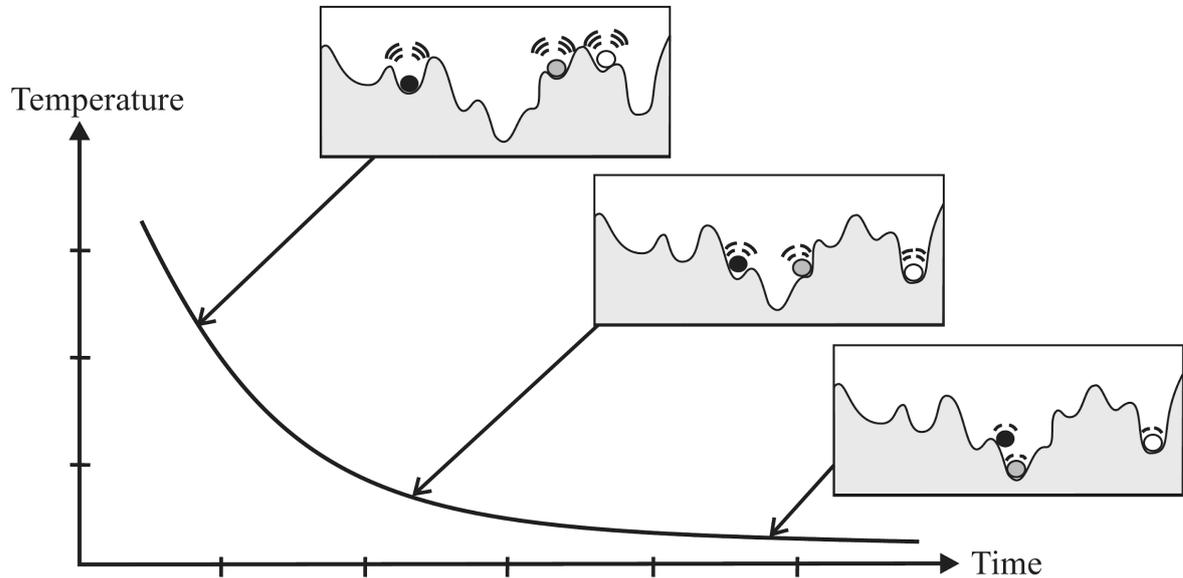
O *Simulated Annealing* é uma meta-heurística para aproximar a otimização global em um amplo espaço de busca. Este método foi proposto por Scott Kirkpatrick em 1983 e foi utilizado para simular o processo de recozimento de metais cujo resfriamento rápido levava a produtos metaestáveis, ou seja, de maior energia interna e o esfriamento lento a produtos mais estáveis, estruturalmente fortes e de menor energia (HWANG, 1988; AARTS; KORST, 1988). Durante o recozimento, o material passa por vários estados possíveis com um tempo suficientemente longo para que qualquer elemento passe por todos os seus estados viáveis.

O *Simulated Annealing* realiza o processo de otimização buscando encontrar a melhor solução viável, considerando o objetivo do problema em questão, e o conjunto de restrições para aceitação da solução proposta. Na Figura 2.2 é possível ver de uma forma simples como é o funcionamento da meta-heurística na busca de soluções para um sistema estável.

Problemas no campo das heurísticas podem ser modelados como problemas de maximização e problemas de minimização de uma função objetivo que, neste caso, parte dos objetivos, é obter a melhor localização de uma determinada ERB com a maior cobertura e qualidade de voz na região informada.

Com um problema de otimização em mãos, encontrar soluções ótimas ou aproximadas do seu ótimo para problemas NP-difícil é um desafio nem sempre fácil de ser alcançado. O uso de heurística para auxiliar na busca por um lugar para estações base se torna de fácil implementação e, como a maioria das heurísticas, produz boas soluções dentro de um tempo viável de acordo com os parâmetros estabelecidos.

Figura 2.2 – Comportamento do *Simulated Annealing* durante a exploração do espaço de busca.



Fonte: (LEDESMA; RUIZ; GARCIA, 2012).

Dentre as demais outras meta-heurísticas presentes na literatura, se optou por utilizar o *Simulated Annealing* por sua flexibilidade e capacidade de se aproximar do ótimo global. Outra fator que motivou a escolha desta meta-heurística é que o algoritmo em si é bastante versátil, pois não depende de nenhuma propriedade restritiva do problema a se resolver o problema em questão.

Após a apresentação do conceitos fundamentais para o desenvolvimento do projeto, na próxima seção são apresentados os trabalhos relacionados presentes na literatura.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Muitos trabalhos presentes na literatura buscam realizar uma melhora na cobertura de sinal de rádio frequência. Nesta seção são apresentados alguns trabalhos que, utilizando diferentes ferramentas e técnicas, conseguiram obter resultados significativos, seja na cobertura de sinal como também na otimização da quantidade de estações rádio base em uma determinada área. Em alguns trabalhos, são utilizados métodos heurísticos ou algoritmos genéticos para resolver o problema de otimização e, em todos, é utilizado algum modelo de propagação que possa se obter a perda pelo percurso.

Em Costa (2016), foi desenvolvido uma ferramenta que se tornou capaz de alocar estações rádio base para sistemas de quarta geração (4G) utilizando o protocolo *Long Term Evolution* (LTE) na cidade de Palmas-TO. Além do mais, o autor realizou uma comparação da alocação de estações rádio base que utilizavam a frequência de 700MHz e 2.5GHz. No artigo de Costa (2016) o autor utilizou uma versão modificada do modelo COST-231 Hata por ser o mais adequado para se trabalhar com o LTE juntamente com uma variação de algoritmo genético, o algoritmo genético, este por sua vez foi utilizado para encontrar o posicionamento ótimo das estações rádio base. O Autor dividiu o problema de alocação de estações rádio base em duas parte, sendo a primeira encontrar quantas estações rádio base serão necessárias para cobrir toda a região e sendo a segunda parte, informar o posicionamento ideal das mesmas. A ferramenta foi desenvolvida totalmente pelo autor e considera apenas a perda no percurso e o rádio de abrangência de cada estação rádio base.

No trabalho de Silva (2004) é realizado uma apresentação de diversos modelos de propagação de sinais para campo aberto (*outdoor*) para o cálculo da perda do percurso. O autor também realiza uma análise e simulação destes modelos a fim de mostrar como acontece o desvanecimento rápido destes modelos de comunicação móvel. Assim, Silva (2004) propõe um novo modelo e realiza uma comparação dos resultados relacionados à análise do sinal, tal como as qualidades e deficiências de cada modelo. O trabalho de Silva (2004) realiza desde a apresentação de sinais até à simulação, porém avalia apenas a perda no caminho dado por cada modelo. Vale ressaltar que o autor utilizou uma ferramenta à parte para a avaliações dos modelos.

Em Schmidt-Dumont e Vuuren (2016), o autor projetou e demonstrou o funcionamento de uma estrutura de suporte à decisão informatizada e flexível capaz de sugerir alternativas de posicionamento de alta qualidade para uma rede de transmissores de rádio em áreas rurais com o objetivo de maximizar a área de cobertura do sinal. A estrutura de sua solução é baseada em uma abordagem de modelagem de otimização combinatória bi-objetiva para aplicação a torres de transmissão de telefonia celular operando com tecnologia 2G. Schmidt-Dumont e Vuuren (2016) apresenta alguns modelos de propagação de sinais em sua revisão da bibliografia, porém define como o modelo de COST 231-Hata sendo o mais adequado

para o seu estudo. Schmidt-Dumont e Vuuren (2016) exhibe o resultado obtido de suas simulações de forma gráfica, utilizando uma ferramenta desenvolvida em outro trabalho. Este trabalho também considera apenas a perda pelo percurso dado pelo modelo COST 231-Hata buscando otimizar a transmissão de rádio apenas pela cobertura do sinal.

Em Al-Falahy e Alani (2019) é realizado um estudo sobre estações base distribuídas com a arquitetura de redes de quinta geração (5G). O trabalho se dá em torno da banda em 26GHz, que foi recentemente lançada para serviços 5G focados em áreas de alta demanda de tráfego no Reino Unido. Foi desenvolvido um algoritmo para o planejamento de estações base distribuídas. Tal algoritmo faz uso do modelo de propagação *Path Loss*, que, como o nome já diz, calcula a perda no caminho entre estação base e estação rádio base. Para as simulações da propagação de sinais, foram utilizados as ferramentas comerciais *Vienna Simulator* e *ICS Designer* (MÜLLER et al., 2018; ATDI, 2019). Os resultados obtidos mostraram uma melhoria significativa na vazão de dados de borda de célula, e a probabilidade de cobertura de *Line-of-Sight* (LoS) foi melhorada.

No trabalho de Amaldi, Capone e Malucelli (2007), o autor faz uso de algumas técnicas para investigar modelos de programação matemáticos para o a realização de um planejamento de rádio 3G, que são responsáveis pelas direções de *uplink* (potência total recebida na estação base) e *downlink* (potência de transmissão na estação base). Outro objetivo do trabalho de Amaldi, Capone e Malucelli (2007) é a configuração das estações base, como altura de antena, inclinação e orientação de setores. O autor utiliza uma meta-heurística para ajudar na solução do seu problema. No trabalho é utilizado a Busca Tabu como meta-heurística considerando a cobertura do sinal, que nada mais é que um algoritmo de busca local na exploração contínua dentro de um espaço de busca conhecido (GLOVER, 1995). Como saída visual, o autor exhibe de forma gráfica, com três níveis de intensidade do sinal (alto, médio e baixo), as localizações das estações base como solução dada pelo algoritmo de Busca Tabu. Amaldi, Capone e Malucelli (2007) utiliza o modelo clássico de Hata para obter o valor do sinal degradado entre as estações.

Em Amorim et al. (2019) faz uma proposta de uma implementação utilizando meta-heurística BRKGA (*Biased Random-Key Genetic Algorithm*), visando alcançar um balanço entre a cobertura do sinal e do custo de serviço. Amorim et al. (2019) reforça também que ERBs são necessárias para a introdução de novas tecnologias e da expansão das atuais, sendo um assunto também muito utilizado para o desenvolvimento de técnicas de posicionamento inteligente, uma vertente deste trabalho.

No trabalho de Nimavat e Kulkarni (2012), o autor utiliza de modelos de propagação para a obtenção do valor da perda pelo percurso e definir um modelo de propagação que seja melhor adequado para diferentes ambientes afim de fornecer diretrizes para o planejamento de células da rede GSM. O autor reforça que a estimativa da perda de caminho é muito importante na implantação inicial da rede

sem fio e no planejamento da célula. O autor complementa e exhibe em seus resultados que, se a perda de caminho aumenta, a potência do sinal também diminui e a taxa de erro de bits também tem um fator crescente. Tais afirmações realizadas pelo autor, são apresentadas junto com a comparação e a análise de três modelos de perda de caminho, sendo eles, o modelo COST 231 Hata, o modelo Ericsson e o modelo COST 231 Walfish-Ikegami.

Nenhum dos trabalhos apresentados nesta seção analisaram os fatores além da potência recebida na cobertura do sinal. A maioria de trabalhos que envolvem esta área de conhecimento, realizam uma apresentação seguida da análise e simulação de modelos computacionais de comunicação móvel, deixando de lado outros parâmetros que podem também interferir diretamente na qualidade final de experiência do usuário, seja na qualidade de voz ou de dados. Dessa forma, mais uma vez se faz a justificativa do desenvolvimento deste trabalho, onde se busca não só levar em consideração a potência recebida do sinal, mas também outros parâmetros do cenário que podem influenciar na cobertura e até mesmo à qualidade de voz.

Na seção seguinte expõe a metodologia de pesquisa utilizada durante o desenvolvimento do projeto.

4 METODOLOGIA

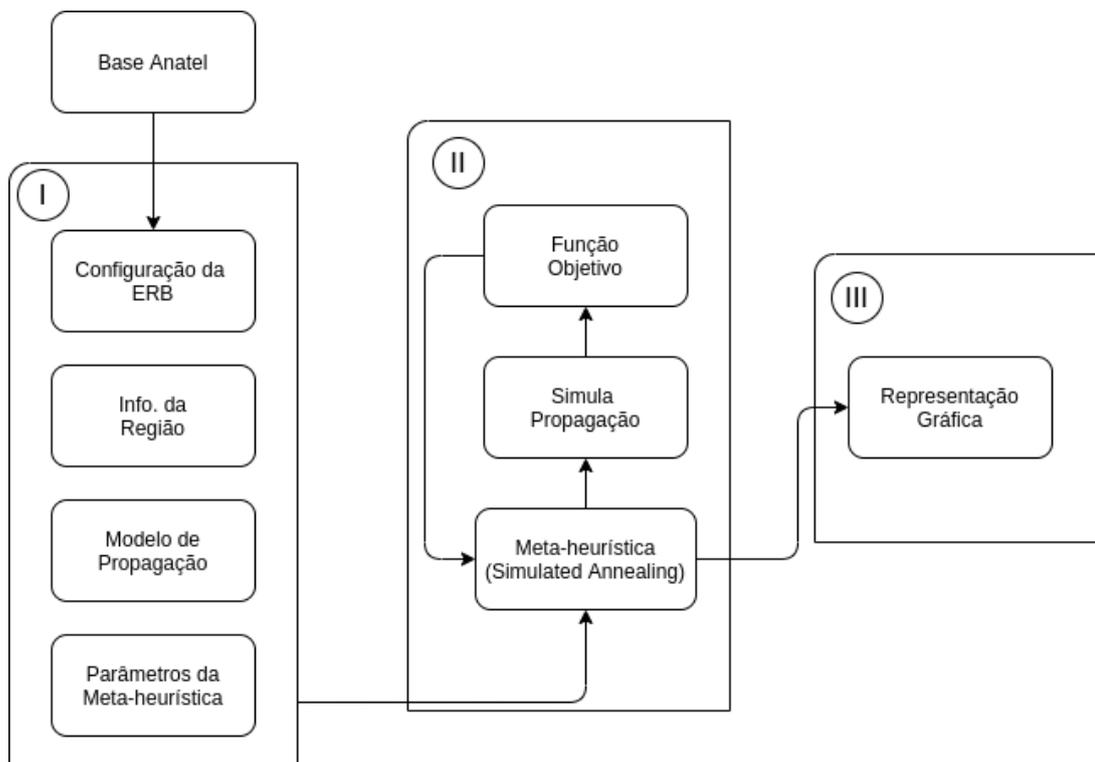
Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, tais como a base de dados on-line disponível da Anatel, o processo utilizado pela meta-heurística para a resolução do problema, estratégias utilizadas para a implementação da função objetivo, as ferramentas utilizadas para a representação gráfica do ambiente junto da escala e precisão e por fim, as referências de elevação do terreno.

As subseções a seguir mostram quais foram os passos e processos utilizados para o desenvolvimento da ferramenta proposta.

4.1 Componentes e processos da ferramenta proposta

A ferramenta desenvolvida nesse projeto, pode ser separada em três fases ou etapas. Tais etapas podem ser definidas como sendo a primeira etapa: a etapa de obtenção de informações básicas para o cenário; a segunda etapa: a execução da busca utilizando a meta-heurística; e a terceira etapa sendo a visualização dos resultados. Na Figura 4.1 é possível ver o fluxo principal do algoritmo com todas as partes que foram implementadas.

Figura 4.1 – Visão geral do fluxo de execução do algoritmo.



Fonte: Do autor (2021).

A seguir são descritos com mais detalhes os componentes que fazem parte das etapas de implementação da ferramenta proposta.

4.1.1 Primeira etapa

A primeira etapa, contém as informações necessárias para a realização da simulação. Tais informações podem ser vistas no Bloco I da Figura 4.1 e são:

- **Configuração da ERB:** São as configurações da ERB que serão utilizadas como parâmetros de entrada da entidade transmissora. Essas informações serão obtidas de uma base de dados atualizada da Anatel.
- **Informações da Região:** É o mapa da região contendo as coordenadas com a localização de instalação da ERB. Essa informação é utilizada para a visualização inicial da simulação e para a busca das ERBs da região definida;
- **Modelo de Propagação:** Para que a simulação da propagação de sinais seja realizada, é necessário escolher qual o modelo de propagação se encaixa melhor com o ambiente a ser simulado. Assim, se faz indispensável a escolha do modelo. Os modelos implementados foram descritos na Seção 2.4;
- **Parâmetros da Meta-heurística:** São os parâmetros necessários para a execução da meta-heurística. Tais parâmetros incluem o número máximo de execuções, temperatura inicial, fator de decaimento da temperatura e número máximo de sucessos por iteração;

Nas subseções seguintes, são descritos os processos que foram implementados para a obtenção dos dados necessários da primeira etapa do fluxo geral de execução da ferramenta.

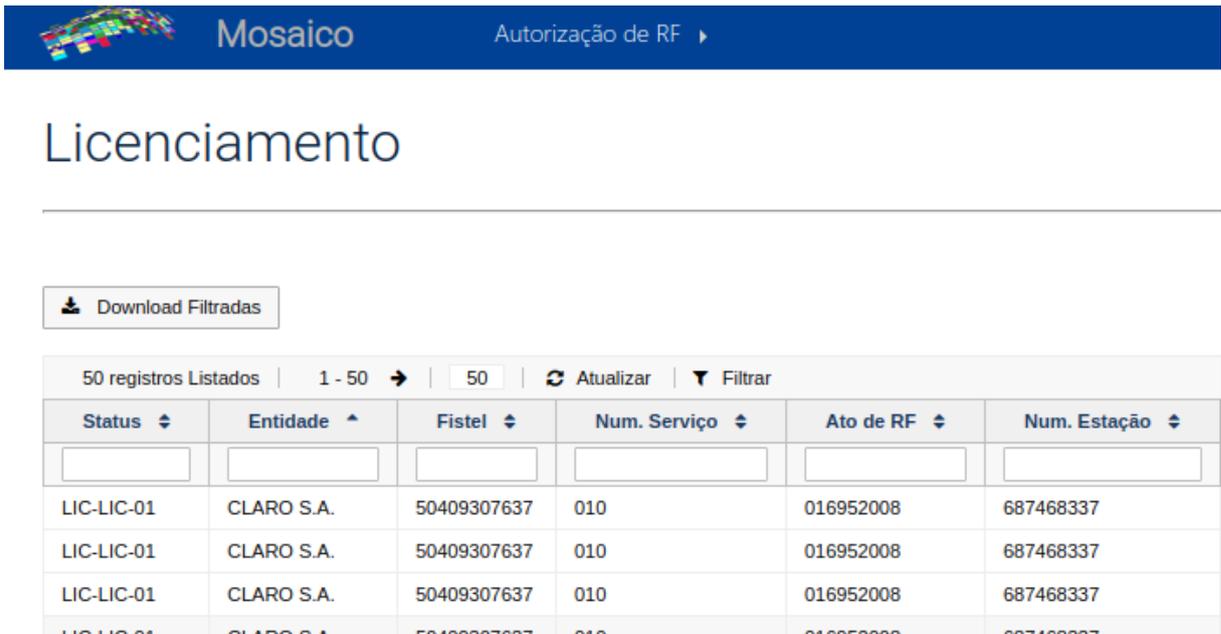
4.1.1.1 Base de dados da Anatel

A Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) é o órgão brasileiro que tem como objetivo, implantar um novo modelo das telecomunicações desde o ano de 1997. A agência é vinculada ao Ministério das Comunicações, mas possui independência financeira e administrativa, no que faz com que não tenha qualquer subordinação hierárquica do governo. A Anatel tem como suas principais funções, a implantação da política nacional de telecomunicações, a regulamentação e a fiscalização do setor de telefonia móvel e fixa, assim como a intermediação de divergências entre consumidores e operadoras.

A Anatel disponibiliza de forma on-line e livre, sistemas para consultas relacionadas aos seus serviços prestados. A agência tem on-line, para uso de usuários não registrados, mais de trinta sistemas.

O sistema que foi consultado para este trabalho foi o MOSAICO, o Sistema Integrado de Gestão e Controle do Espectro, para a busca de estações rádio base licenciadas. Na Figura 4.2 é possível ver como é a interface web para a busca de informações das ERBs.

Figura 4.2 – Página web do Sistema MOSAICO.



The screenshot shows the MOSAICO web interface. At the top, there is a blue header with the MOSAICO logo and the text "Autorização de RF". Below the header, the word "Licenciamento" is displayed in a large font. Underneath, there is a "Download Filtradas" button. A table is shown with the following columns: Status, Entidade, Fistel, Num. Serviço, Ato de RF, and Num. Estação. The table contains several rows of data, all showing "LIC-LIC-01" as the status and "CLARO S.A." as the entity.

Status	Entidade	Fistel	Num. Serviço	Ato de RF	Num. Estação
LIC-LIC-01	CLARO S.A.	50409307637	010	016952008	687468337
LIC-LIC-01	CLARO S.A.	50409307637	010	016952008	687468337
LIC-LIC-01	CLARO S.A.	50409307637	010	016952008	687468337
LIC-LIC-01	CLARO S.A.	50409307637	010	016952008	687468337

Fonte: Do autor (2021).

O cadastro das estações base no sistema, tem como o objetivo principal de licenciá-las. Este licenciamento é uma fase após a aprovação do serviço e, após a estação rádio base licenciada, as suas informações agora fazem parte do Banco de Dados Técnico-Administrativo da Anatel (BDTA). A solicitação de licenciamento de estações pode ser feita apenas por entidades que detêm autorização, concessão ou permissão para explorar o serviço, logo, todas as informações consultadas no sistema, tem total integridade.

Dentre as informações dos resultados da consulta realizada no sistema se tem dados importantes como: a qual operadora pertence a estação base, o endereço onde está implantada, a frequência inicial e frequência final, o ganho da antena, a elevação, o tipo de polarização, a altura da antena, a potência de transmissão, as informações de latitude e longitude em notação DMS (*Degrees, Minutes and Seconds*) e por fim, a data de licenciamento da estação.

A base de dados da Anatel é a oficial e principal referência deste trabalho sobre as configurações reais das ERBs instaladas em todo o território brasileiro. Posteriormente é esclarecido como estas informações são obtidas e quais recursos foram utilizados.

A seguir é descrita a segunda etapa contendo os principais componentes necessários para a implementação da ferramenta.

4.1.2 Segunda etapa

A segunda etapa é caracterizada por realizar a propagação de sinais utilizando os parâmetros de entrada como as descritas anteriormente junto a execução da meta-heurística. Nesta etapa, ilustrada no Bloco II da Figura 4.1, é exibido como é o funcionamento da ferramenta para a otimização da busca de localização de ERBs. São utilizados os parâmetros descritos anteriormente na primeira etapa. Nesta parte, foi implementado a meta-heurística que realiza a busca pela localização ótima de alocação da ERB considerando os valores de potência recebida, altura e demais informações obtidas na primeira etapa.

As subseções seguintes, descrevem os processos necessários implementados para a otimização e busca da solução sugerida pela meta-heurística, fazendo parte então da segunda etapa do fluxo geral de execução da ferramenta.

4.1.2.1 Meta-heurística de otimização

Para o cumprimento dos objetivos e a obtenção de um bom resultado, é implementada a meta-heurística, que irá explorar o espaço de soluções de posicionamento das ERBs no modelo espacial do ambiente, visando à maximização da cobertura do sinal (dentre outras possíveis métricas). Conforme exposto na Seção 2.5.1, é então implementada a meta-heurística proposta por Kirkpatrick et al. (1983). O *Simulated Annealing* é utilizado para a realização do processo de otimização e busca de uma melhor solução factível, considerando o conjunto de restrições para aceitação da solução.

O pseudocódigo da meta-heurística com funções genéricas que foram implementadas neste trabalho é apresentado a seguir:

Estes são os identificadores utilizados:

- S_0 : Configuração Inicial (Entrada);
- S_i : Configuração da Iteração i ;
- S : Configuração Final;
- T_0 : Temperatura Inicial;
- M : Número máximo de iterações (Entrada);
- P : Número máximo de Perturbações por iteração (Entrada);
- L : Número máximo de sucessos por iteração (Entrada);
- α : Fator de redução da temperatura (Entrada);

Algorithm 1 Simulated Annealing

```

1: function SIMULATED_ANNEALING ( $S_0, M, P, L, \alpha$ )
2:   /* Inicialização das variáveis */
3:    $S = S_0$ 
4:    $T_0 = TempInicial()$ 
5:    $T = T_0$ 
6:    $j = 1$ 
7:   /* Loop principal */
8:   /* Verifica se foram atendidas as condições de término do algoritmo */
9:   repeat
10:     $i = 1$ 
11:     $nSucesso = 0$ 
12:    /* Loop Interno */
13:    /* Realização de perturbação em uma iteração */
14:    repeat
15:       $S_i = Perturba(S)$ 
16:       $\Delta_{Fi} = f(S_i) - f(S)$ 
17:      /*Teste de aceitação de uma nova solução*/
18:      if ( $\Delta_{Fi} \leq 0$ ) or ( $exp(-\Delta_{Fi}/T) > Randomiza()$ ) then
19:         $S = S_i$ 
20:         $nSucesso = nSucesso + 1$ 
21:         $i = i + 1$ 
22:      until ( $nSucesso \geq L$ ) or ( $i > P$ )
23:       $T = \alpha \times T$ 
24:      /* Atualização do Contador de iterações */
25:       $j = j + 1$ 
26:    until ( $nSucesso = 0$ ) or ( $j > M$ )
27:    /* Saída do Algoritmo */
28:  return  $S$ 

```

- $f(S_i)$: Valor da função objetivo correspondente á configuração S_i ;
- $nSucesso$: Contador de sucesso em uma iteração;
- i e j : Variáveis de controle de *Loops*.

Além dos indicadores acima, considerou-se as seguintes funções:

- $Perturba(S)$: Função que realiza uma perturbação na Solução S , alterando a posição atual da ERB em um raio definido pelo usuário (por padrão se considera 60 metros);
- $Randomiza()$: Função que gera um número aleatório uniforme no intervalo $[0, 1]$;
- $TempInicial()$: Função que calcula a temperatura inicial, proporcional às dimensões do ambiente simulado.

A Figura 4.3 mostra como é a implementação do fluxo de execução do algoritmo da meta-heurística na busca de uma solução ótima.

Como descrito na Seção 2.5.1, um dos motivos pelo qual se utilizar tal meta-heurística no desenvolvimento do projeto, se deve a sua flexibilidade e a capacidade de aproximação do ótimo global, ou seja, se aproxima de uma solução próximo do ideal sugerindo uma solução melhor que a já existente.

A seguir, é descrito a forma como é realizada a avaliação das soluções encontradas durante a exploração do espaço de busca da meta-heurística.

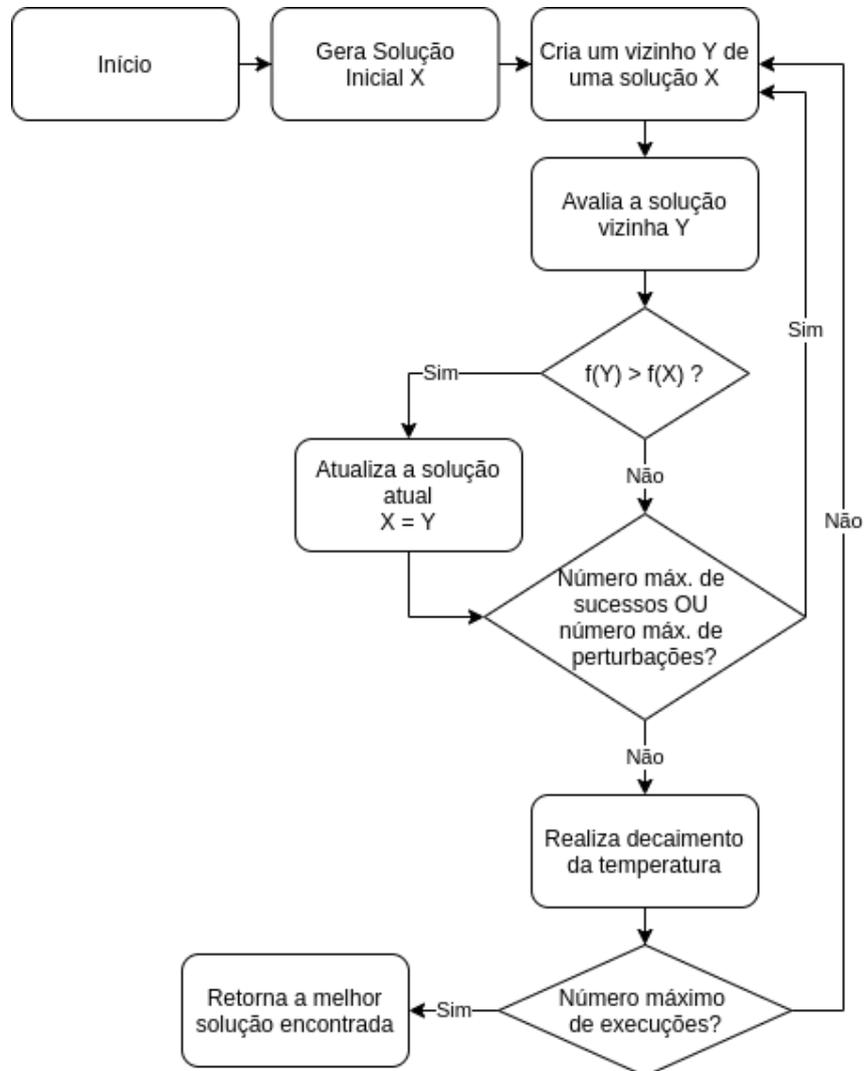
4.1.2.2 Função objetivo e avaliação das soluções

Para a implementação do *Simulated Annealing*, se faz importante a decisão de uma boa função objetivo. A função objetivo está diretamente ligada à eficácia com que o *Simulated Annealing* irá buscar o ótimo global. A função objetivo tenta buscar um valor ótimo, seja ele maximizar lucros ou minimizar perdas com base em um conjunto de restrições e no relacionamento entre uma ou mais variáveis de decisão.

As restrições do algoritmo podem se referir à capacidade, disponibilidade, recursos, e outros. e refletir as limitações do ambiente a ser otimizado. É realizado a combinação de valores que se aplica às variáveis de decisão relacionadas à solução do problema. Quando esses valores satisfazem as restrições do problema, a solução é uma solução viável do problema. A função objetivo funciona como se fosse uma nota dada para a solução encontrada, quanto maior for a nota, melhor é aquela solução.

Para a exploração de novas soluções no espaço de busca do *Simulated Annealing*, a função objetivo é implementada a fim de maximizar a cobertura do sinal de propagação da ERB levando em

Figura 4.3 – Fluxograma de execução do algoritmo *Simulated Annealing* sob o problema.



Fonte: Do autor (2021).

consideração a potência do sinal recebido, ou seja, buscar uma região onde a qualidade e cobertura do sinal de rádio seja relativamente bons.

As seguintes subseções apresentam a organização e os métodos utilizados para a avaliação da solução dada pelo *Simulated Annealing*.

4.1.2.3 Avaliação da cobertura de RF

A função objetivo para a avaliação da simulação de RF foi implementada de uma forma simples. Para a solução, foi utilizada uma matriz que contém em cada posição, o resultado da potência do sinal resultante do modelo de propagação em um determinado ponto. Conforme o sinal se propaga pela área definida, o valor obtido do modelo de propagação, representando uma indicação numérica da cobertura

do sinal de RF, é guardado para uma posterior avaliação. O mesmo processo é aplicado para todos os pontos dentro do espaço de simulação.

Após ter calculado o valor para cada ponto da matriz representando a força do sinal, é realizado a sumarização de todos valores da matriz de potência recebida resultante da simulação. Essa etapa é executada para obtenção de um único valor representando a solução obtida da propagação de sinais da ERB em uma localização específica. Tal valor é utilizado pelo *Simulated Annealing* durante seu processo de execução para a realização da comparação entre a solução atual e a nova solução obtida de uma posição geográfica diferente.

Desse modo, a função objetivo tem como propósito, auxiliar na busca de novas soluções que visa maximizar a cobertura do sinal de RF, levando em conta as possíveis perdas e limitações que o sinal pode receber ao ser propagado em regiões diferentes.

A seguir são descritos os componentes e processos que fazem parte da terceira e última etapa de implementação da ferramenta.

4.1.3 Terceira etapa

A terceira e última parte é composta pela saída da simulação. Com a simulação da busca pelo posicionamento ótimo da ERB, é gerado um mapa de calor (*heat map*) a fim de exibir graficamente a cobertura pela potência recebida. Esta forma de exibição contém informações que auxiliarão na comparação da posição atual das ERBs e da posição otimizada sugerida pela meta-heurística.

A seguir são definidos as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento da interface gráfica.

4.1.3.1 Interface Gráfica

A interfaces gráficas ou também chamadas de *Graphical User Interfaces* (GUI), são utilizadas por aplicações que necessitam de interação contante com o usuário. Uma aplicação utilizar uma interface gráfica faz com que a interação entre homem e máquina se torne mais natural e usual se comparado com interfaces textuais

Dito isso, para uma boa interação com o usuário e fácil execução de toda a simulação, este trabalho dispõe de uma interface gráfica implementada na linguagem Python. A mesma facilita a visualização dos resultados e busca também facilitar a escolha dos dados de entrada do algoritmo descritas na primeira parte.

Qt Toolkit: O *Qt Toolkit*, também conhecido popularmente como Qt é uma aplicação multiplataforma e um *framework* UI (conjunto de ferramentas) desenvolvido pela empresa Trolltech (e agora mantido pelo *Qt Project*) no qual é utilizado por desenvolvedores para o implementação de aplicações

GUI. O Qt foi criado originalmente no C++ para desenvolver aplicações *desktop*, porém hoje esta ferramenta oferece suporte multiplataforma, podendo ser executada em sistemas Windows, mac OS X, Linux e outras plataformas UNIX.

O Qt é e foi utilizado por diversas empresas de grande renome no mundo tecnológico, tais como a Google, NASA, Disney, Samsung, Philips, Volvo, etc. O mesmo influenciou e serviu como base para a criação de ambientes *desktop* como o KDE.

Tendo a linguagem Python como a linguagem principal de desenvolvimento deste trabalho, foi então utilizado a biblioteca PyQt para a implementação gráfica do mesmo. Tal biblioteca torna possível e de forma transparente, o uso dos recursos de componentes que compõe uma interface gráfica, como botões, leiautes, campos de texto, janelas e etc.

O PyQt faz uso de camadas de portabilidade chamadas de *bindings*. Estas camadas fazem com que aplicações pensadas em serem executadas como multiplataforma, possam combinar todas as funcionalidades do Qt com da linguagem Python. Utilizando a biblioteca PyQt é possível incluir recursos do *Qt Toolkit* no código Python, fazendo com que todas as funcionalidades e componentes (chamados também de *widgets*) estejam disponíveis no momento da execução do código.

Qt Designer: O *Qt Designer* é uma ferramenta que permite criar rapidamente interfaces gráficas com componentes a partir da estrutura da GUI do Qt. Ele fornece uma interface simples, permitindo ao desenvolvedor arrastar e soltar componentes, como botões e campos de texto, afim de facilitar a organização os mesmos no leiaute da tela.

Os arquivos de leiaute desta ferramenta, quando salvos, possuem o formato *.ui*. Este é um formato especial baseado em XML que armazena todos os componentes da tela como uma árvore. É possível carregar esses arquivos em tempo de execução ou traduzi-los para uma linguagem de programação como C++ ou Python.

O *Qt Designer* foi essencial para a implementação e planejamento da interface com o usuário. Para o desenvolvimento do leiaute da aplicação foi utilizada a versão 5 e a mesma pode ser instalada facilmente em qualquer sistema operacional seguindo o passo a passo de configuração fornecido no site do Qt.

Fman Build System: O *Fman Build System*, ou simplesmente fbs, nada mais é que uma ferramenta baseada na linguagem Python para o desenvolvimento aplicativos *desktop* que usam PyQt. O fman é uma alternativa aos gerenciadores de arquivos e janelas, como o *Explorer* no Windows ou o *Finder* no macOS. Nele é possível procurar diretórios, copiar ou mover arquivos, montar unidades externas.

Algumas das soluções de código aberto que utilizam o fbs, inicialmente foram implementadas para serem executadas no fman. O fbs faz com que seja possível transformar todo o código fonte em um executável, independente de qual sistema operacional, seja Windows, Mac ou Linux.

Em um contexto de compilação de código para multiplataforma, o fbs é uma alternativa leve ao *Electron*. Diferente de outras alternativas para o fim, o fbs torna fácil o empacotamento e compilação do código fonte da aplicação. Isso faz com que seja simples, fácil e rápido criar um instalador para diferentes plataformas.

O fbs é utilizado no desenvolvimento deste trabalho afim de tornar possível a execução da ferramenta em diferentes sistemas operacionais, e também facilitar o compartilhamento e instalação do mesmo no sistema operacional do usuário.

O código fonte do fbs está disponível no GitHub e pode ser utilizado gratuitamente em projetos de código aberto sob licença GPL.

4.2 Descrição dos parâmetros do cenários de simulação

Para que seja possível analisar a propagação de rádio frequência, é necessário que tenhamos a possibilidade de utilizar alguns cenários que representem o mundo real. Dessa forma, a ferramenta desenvolvida neste trabalho proporciona recurso para selecionar ERB a ser utilizada e também campos que permitem informar os diferentes parâmetros de entrada sobre antena receptora (base móvel), como a altura, ganho, sensibilidade e dentre outras itens que são necessárias para a realização da simulação.

No leiaute da aplicação, as informações de entrada sendo elas, as configurações de entrada para o cenário de simulação, encontram-se divididas em cinco contextos diferentes ou abas.

A Figura 4.4 mostra como as informações estão organizadas em forma de abas no leiaute principal da aplicação.

Sendo assim, na Figura 4.4, as abas estão divididas da seguinte forma:

- A primeira aba (Figura 4.3a), rotulada como Transmissor, é organizada as informações do transmissor e contém as informações de localização da ERB;
- A segunda aba (Figura 4.3b), rotulada como Receptor, é organizada com as informações técnicas da antena;
- A terceira aba (Figura 4.3c), rotulada como Modelo de Propagação, contém as informações do dispositivo cliente que recebe as informações enviadas da ERB;

Figura 4.4 – Simples organização dos cenários na aplicação.

(a) Aba Transmissor da aplicação

Detalhes do Transmissor (Anatel)

Estação Radio Base
TELEFÔNICA BRASIL S.A. - UFL

Entidade
TELEFÔNICA BRASIL S.A.

Número Fistel
687462363

UF
MG

Município
3138203

Endereço
UFLA - PRÓXIMO AO

Freq. Final (MHz)
880

Freq. Inicial (MHz)
869

Azimuth
160.0

Ganho Antena
16.1

Frente Costa
25.0

Angle 1/2 Pot.
74.0

Elevação
17.7

(b) Aba Receptor da aplicação

Detalhes do Receptor (Base Móvel)

Altura

Ganho
 dBi

Sensibilidade
 dBm

(c) Aba Modelo de Propagação da aplicação

Propagation details

Modelo de Propagação
Selecionar

Ambiente
Selecionar

(d) Aba Meta-heurística da aplicação

Configurações Simulated Annealing

Temperatura Inicial

N Max. de Iterações

N Max. de Perturbações por Iteração

N Max de Sucessos por Iteração

Alpha

(e) Aba Saída da aplicação

Configurações de Saída

Esquema de Cores
Selecionar

Raio
60 m

Resolução Atual 60m

Fonte: Do autor (2021).

- A quarta aba (Figura 4.3d), com nome de meta-heurística, contém as informações sobre o modelo de propagação a ser utilizado na simulação da propagação de sinais;

- E por último (Figura 4.3e), a quinta aba rotulada Saída, contém as configurações de saída da ferramenta como qual o *colormap* utilizado para a visualização de saída e o raio máximo de propagação do sinal.

A seguir, será apresentado o processo de representação do ambiente de simulação.

4.3 Representação do Ambiente

O modelo do ambiente utiliza como caso de estudo, o mapa geográfico da cidade de Lavras onde atualmente tal região, segundo dados da Anatel, comporta as operadoras Vivo, Claro, TIM e Oi. Tipicamente, para a orientação e conhecimento de rotas, são utilizadas ferramentas com mapas, sendo as mais famosas o Google Maps e Waze. Os mesmos, ainda podem ser usados para a localização de coordenadas geográficas, ou até mesmo a visualização do local quando as se tem previamente.

Para a realização deste trabalho, não é necessário a utilização de uma ferramenta para manipulação e visualização de mapas geográficos que disponibilizem recursos completos de rotas como acontece com o Google Maps e o Waze. Sendo assim, a ferramenta *Open Street Map*, que muitas vezes também é utilizada como substituta das ferramentas comentadas anteriormente, já supre todas as necessidades necessárias para a visualização gráfica dos resultados obtidos.

O *Open Street Map* disponibiliza recursos que facilitam o uso de mapas em aplicações não-comerciais e como este trabalho se propõe a seguir a filosofia de código livre e de código-fonte aberto (FOSS3), optará por utilizar os recursos disponibilizado pelo *Open Street Map*, que podem ser facilmente encontrados no site oficial. A seguir são descritos alguns conceitos desta ferramenta utilizada para a visualização dos resultados.

4.3.1 Open Street Map

Soluções de mapeamento hoje em dia têm se tornado algo relevante na vidas de pessoas. Os recursos de localização são utilizados para a procura de um determinado endereço, obter instruções de direção, obter localização exata de estabelecimentos comerciais dentre outras coisas. A maioria das informações tem uma localização e, se algo tiver uma localização, ela poderá ser exibida em um mapa.

O *Open Street Map* ou OSM, é um projeto desenvolvido de código aberto e seus dados são atualizados coletivamente de forma que os mapas de ruas são informados pelos usuários. O OSM segue um modelo similar ao que originou a Wikipedia, onde seu objetivo é criar uma base de dados de mapa que seja gratuito para uso, editável e licenciado sob direitos autorais.

Toda a base de dados é sustentada por um número considerável de colaboradores, e um outro grupo principal, estimado em aproximadamente 40 voluntários, que dedicam seu tempo à criação e aprimoramento da infraestrutura do OSM, incluindo a manutenção do servidor, a criação da ferramenta principal que lida com as transações realizadas no servidor e criando saídas cartográficas. Há também uma comunidade crescente de desenvolvedores que desenvolvem ferramentas para disponibilizar dados no OSM, isso pra que posteriormente seja utilizados em diferentes tipos de aplicações, plataformas e dispositivos de *hardware*.

Desta forma, neste trabalho será utilizado o *Open Street Map* para a visualização final da propagação de sinais utilizando recursos de *heat map* como saída gráfica da ferramenta.

4.3.2 Escala e precisão

Observe que, a partir dos valores de coordenadas limítrofes, obtém-se as dimensões do modelo bidimensional e, desde que esteja disponível a informação sobre a área de simulação, pode-se calcular a escala do mapa para o tamanho real da região. De posse das dimensões definidas da área da região, pode-se também representá-la computacionalmente como um arranjo bidimensional, ou seja, uma matriz de tamanho *Comprimento (X) Largura*, podendo ser utilizada uma escala 1:1 do ambiente simulado para o ambiente real. Neste caso, uma célula da matriz representaria $1 m^2$ no mundo real.

Ainda assim, vale ressaltar que a ferramenta desenvolvida é capaz de trabalhar com diferentes níveis de precisão na simulação de propagação de sinais, onde caso seja necessário utilizar uma precisão de $0,5 m^2$ por célula da matriz, bastaria informar tal configuração de forma que a ferramenta passe a utilizar um fator de escala de $2.0x$ a dimensão real da área definida da região (pois precisão = $1/\text{escala}$). Assim, a ferramenta poderá trabalhar com a precisão informada pelo usuário, podendo inclusive realizar uma simulação de propagação de ondas onde cada célula da matriz tenha a dimensão de um comprimento de onda ($\lambda = c/f$). Entretanto, vale ressaltar que quanto maior a precisão da simulação, maior serão as dimensões da matriz que representa o ambiente e, portanto, mais demorada será a simulação computacional.

Para a visualização dos resultados dos testes e possibilitar uma melhor interpretação, serão utilizados os recursos disponibilizados pelo *Open Street Map*, como descrito na Seção 4.3.1, para prover a visualização gráfica da matriz contendo os resultados dos cálculos de intensidade de sinal em cada ponto do modelo simulado, conforme proposto pelo modelo de propagação previamente informado. A escala utilizada para obtenção dos resultados exibidos no Capítulo 5 foi de 1:12, ou seja, para representar uma área de $36km^2$ (6km X 6km) foi utilizado uma matriz de 500x500.

Mais detalhes de recursos necessários para a representação visual do ambiente simulado são tratado nas seções seguintes.

4.4 Referência de elevação do terreno

Afim de buscar um resultado de simulação o mais próximo da realidade, conseqüentemente deve-se ter um maior detalhamento do cenário utilizado. Uma informação básica, mas que deixa todo o processo mais próximo do realista, é a referência da altitude do terreno. Para se obter tal recurso, foi utilizado dados de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) contendo as informações topográficas da área de simulação.

Os conjuntos de dados de SRTM são um esforço colaborativo entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA - anteriormente mais conhecida como *National Imagery and Mapping Agency*, ou NIMA), bem como a participação da Agências espaciais alemãs e italianas, para gerar um modelo de elevação digital global (*digital elevation model* ou DEM) da Terra usando interferometria de radar (OBSERVATION; CENTER, 2017).

Os dados SRTM são distribuídos em dois níveis: SRTM1 (para os EUA e seus territórios e possessões) com dados amostrados em intervalos de um arco-segundo em latitude e longitude e SRTM3 (para o restante do mundo) amostrados em três arco-segundos. Arco-segundo é uma medida usada para medir ângulos e 1 arco-segundo corresponde a 1/3600 graus.

Os dados são divididos em blocos de latitude e longitude um por um grau na projeção "geográfica", o que resulta em uma apresentação em forma de malha quadriculada com intervalos iguais de latitude e longitude, fácil de manipular e resultando em algo similar a um mosaico.

Os dados de SRTM utilizados no projeto podem ser encontrados em um repositório dedicado da *United States Geological Survey*. Os dados estão organizados em arquivos e os mesmos são nomeados referenciando-se à latitude e longitude do canto esquerdo inferior do bloco geográfico. Os arquivos de altitude possuem a extensão .hgt e são arquivos binários. Por exemplo, o arquivo N37W105.hgt tem seu canto esquerdo inferior a 37 graus de latitude norte e 105 graus de longitude oeste. Para ser mais exato, essas coordenadas referem-se ao centro geométrico do pixel inferior esquerdo, que no caso dos dados SRTM3 terá cerca de 90 metros de extensão.

Foram utilizados especificamente os arquivos S21W045, S21W046, S22W045 e S22W046 para a obtenção das informação de elevação do terreno. Os mesmos são mais do que suficientes para, inicialmente, se ter dados da região de Lavras/MG. A informação da altitude do terreno, será utilizada também para que durante a simulação da propagação sinal de rádio, seja possível localizar pontos onde não é capaz de ter uma boa recepção do sinal.

Os valores utilizados como parâmetros de entrada na meta-heurística e o restante do cenário para a obtenção dos resultados são descritos no próximo capítulo.

5 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e a explicação dos procedimentos desenvolvidos para a obtenção de informações necessárias para a realização da simulação.

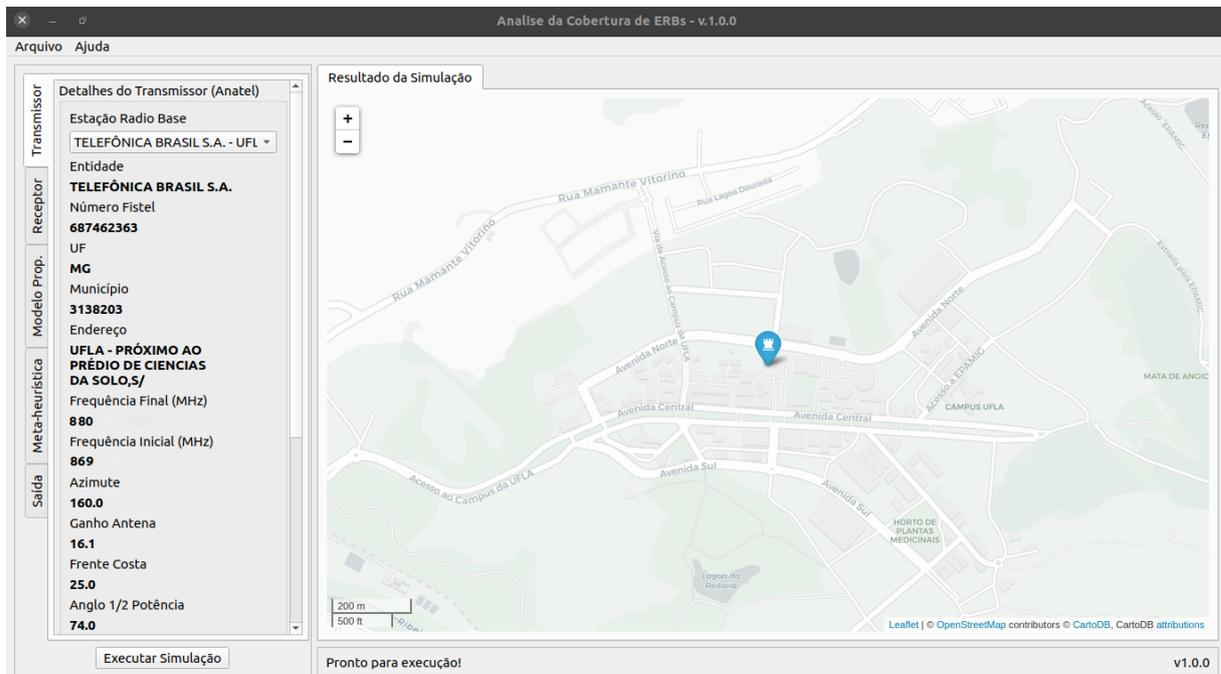
Diferentes testes computacionais foram efetuados para verificar a eficiência da ferramenta desenvolvida. Foi utilizado um computador com processador Intel Core i7-4510U de 3.10 GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Linux Ubuntu 20.04 de 64 bits. A versão final da ferramenta implementada foi desenvolvida utilizando a linguagem Python e a IDE PyCharm Professional para a codificação dos *scripts*.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos a partir da implementação da ferramenta e explicações sobre os procedimentos utilizados.

5.1 Funcionalidades da ferramenta proposta

Como dito anteriormente, foi desenvolvida uma interface gráfica para que o usuário possa interagir com as simulações realizadas na ferramenta. A Figura 5.1 mostra como é a tela principal da ferramenta ao ser executada.

Figura 5.1 – Tela principal da ferramenta desenvolvida.



Fonte: Do autor (2021).

Os componentes e o *designer* da aplicação foram pensados para tornar fácil e intuitiva a execução da simulação da propagação de sinais. Como o contexto do trabalho envolve realizar a simulação de uma

região territorial, a tela principal da ferramenta compõe, em sua maior dimensão, o mapa da região definida pela ERB selecionada.

5.1.1 Busca de informações de ERBs

O devido local onde as informações sobre as ERBs brasileiras foram obtidas foi dito na Seção 4.1.1.1. Essas informações são pontos-chave como parâmetros de entrada para a execução da simulação da propagação de sinais.

Como visto na Seção 4.1.1.1, com a disponibilidade de todas as características e informações das ERBs pelo Sistema MOSAICO da Anatel, se torna viável o acesso e manipulação dos dados. Com tais dados disponíveis, foi implementado uma rotina na ferramenta que realiza a mesma requisição para *download* dos itens presentes na base da Anatel.

Tais informações de ERBs são salvas em um banco de dados relacional *SQLite*. É necessário fazer com que os itens sejam salvos de maneira off-line, para que seja fácil e rápido buscar as informações assim que solicitadas no momento da simulação. Outro motivo também é pelo fato de ser possível utilizar a aplicação sem conexão com a internet, uma vez que sistema MOSAICO funciona apenas com conexão com a internet.

Salvando os dados das ERBs off-line faz com que seja feito uma espécie de *cache* das informações e caso seja necessário mudar a região a ser simulada, ou realizar a simulação em mais de um local, as informações já estão prontas para o uso. Para que não seja carregado um grande número de ERBs desnecessárias, é utilizado uma estratégia de ser buscada apenas as características das ERB de uma região previamente determinada, que no caso do contexto do trabalho é da cidade de Lavras.

Na Figura 5.2 é possível ver como são organizadas as informações das ERBs que são obtidas do sistema on-line MOSAICO da Anatel.

Para a coleta dos itens exibidos na Figura 5.2, é necessário realizar um fluxo que faça busca on-line das informações de ERBs de uma determinada região. O fluxo segue então os seguintes passos:

- Passo 1: O usuário deve selecionar o estado desejado na lista de estados;
- Passo 2: O usuário deve selecionar a cidade desejada na lista de cidades do estado posteriormente selecionado;
- Passo 3: O usuário deve clicar no botão "Atualizar Base de Dados" e em seguida será realizado uma requisição no sistema MOSAICO solicitando as informações de ERBs disponíveis daquela região;

Figura 5.2 – Janela de obtenção das informações das ERBs do sistema MOSAICO.

ID	STATUS	ENTIDADE	FISPEL	NUM. SERVIÇO	ATO DE RF	NUM ESTAÇÃO	ENDEREÇO	UF	MUNICIPIO
1	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	16972008	5101891	RUA ...	MG	3138203
2	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	16972008	5101891	RUA ...	MG	3138203
3	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	16972008	5101891	RUA ...	MG	3138203
4	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
5	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
6	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
7	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
8	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
9	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
10	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
11	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203
12	LIC-LIC-01	TELEFÔNICA BRASIL S.A.	50409146285	10	679892007	5101891	RUA ...	MG	3138203

Atualizar Base de Dados MG Lavras

Base de Dados Atualizada em 14/04/2021 às 23:01:55 100% completo

Fonte: Do autor (2021).

- Passo 4: Em seguida, será realizado o *download* das informações de acordo com os parâmetros da região que o usuário informou;
- Passo 5: Feito o download das informações, as mesmas serão processadas e inseridas no banco de dados da aplicação;
- Passo 6: Com as informações no banco de dados local, é feito o carregamento das informações para a tela e visualização.

É necessário que as informações sobre as configurações salvas off-line para uma consulta das entidades disponível na região e também para uma simulação mais ágil, sem ter que buscar os parâmetros das ERBs toda vez que for necessário reproduzir um cenário real com instalações cadastradas pela Anatel. Os dados persistidos são mantidos até que o usuário deseje buscar novas informações de ERBs em outra localidade.

A seção seguinte retrata como é apresentado o resultado gráfico obtido de uma simulação das RF.

5.1.2 Simulação da propagação de sinais de rádio

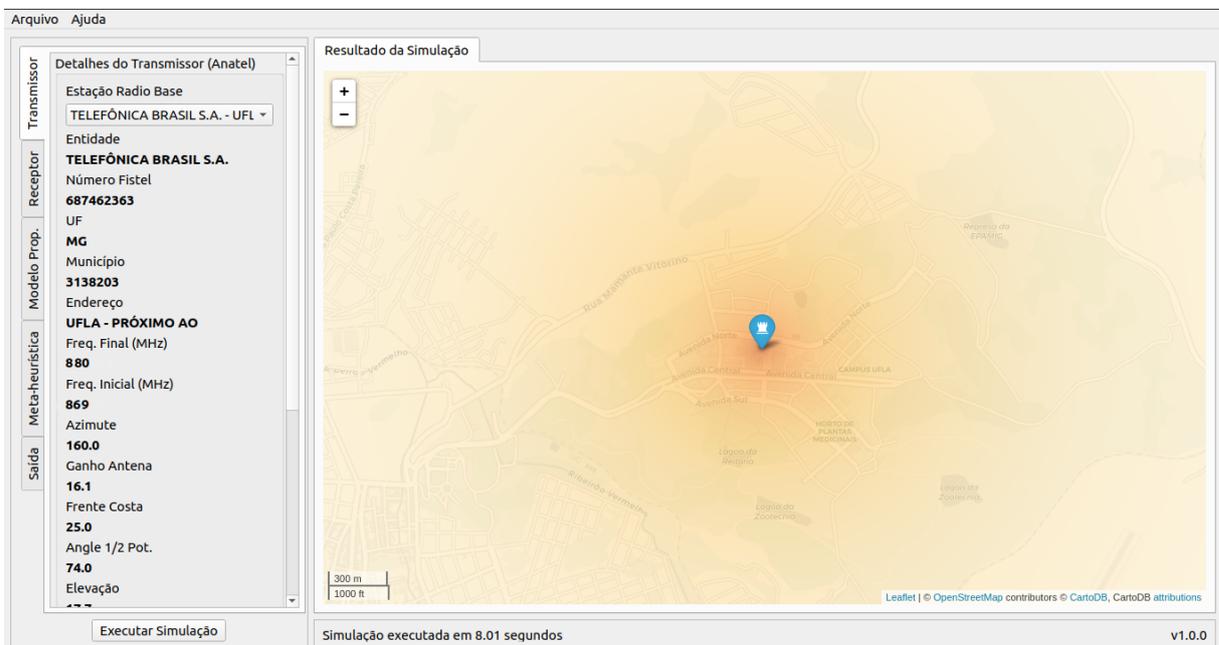
As simulações gráficas realizadas referentes à propagação de sinais têm, como objetivo exibir a potência recebida do sinal, considerando tanto o seu decaimento com a distância quanto sua perda

por fatores aplicados no modelo de propagação, ou seja, demonstrar graficamente o seu respectivo valor dentro da matriz de propagação.

Dessa forma, a aplicação conta com um mapa da região logo na sua tela principal, como dito na seção anterior. Esse mapa é um componente de *layout* pensado em ser utilizado para a visualização dos resultados obtidos pela simulação.

Nesse componente, é possível obter o mapa de calor resultante pela simulação de propagação de sinais na região especificada pelo usuário. O resultado em forma gráfica com mapa de calor sem considerar as características do terreno pode ser visto na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Tela principal da ferramenta contendo o resultado de uma simulação de RF.



Fonte: Do autor (2021).

Na Figura 5.3 é possível visualizar como é o decaimento do sinal conforme a distância da ERB aumenta. A Figura 5.3 é referente a uma ERB presente dentro do campus da UFLA, onde a mesma, nesta simulação específica, possui uma área de simulação abrangendo grande parte da universidade e bairros vizinhos, no que totaliza cerca de 16 km^2 . Como dito antes, para esta execução de RF não foram consideradas as alturas específicas do terreno. As alturas foram consideradas para a otimização das posições de alocação da ERB na seção 5.1.3.

Os parâmetros utilizados para a realização da simulação da propagação de sinais por ser ver na Tabela 5.1.

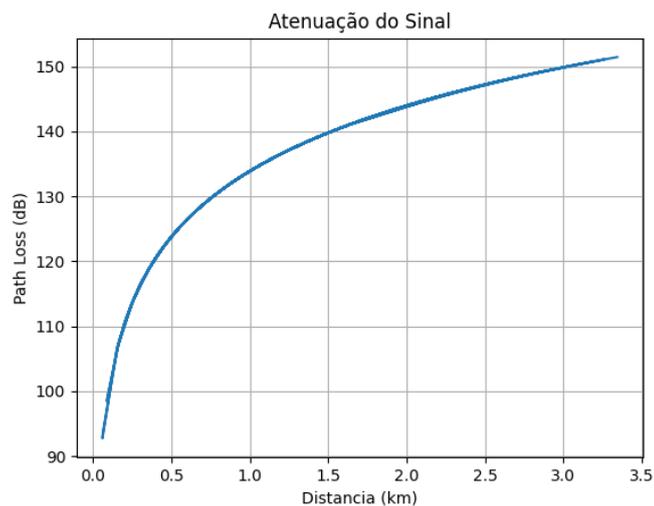
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para modelos de propagação.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	<i>Free-space path loss</i>
Potência de transmissão ERB	60 Watts
Altura antena ERB	56 metros
Altura antena EM	1 metro
Frequência de Operação	869 - 880MHz
Distância máxima Tx e Rx	0 - 3,5km

Fonte: Do autor (2021).

Com a Figura 5.4 é possível ver como se dá o comportamento da perda no caminho (*Path Loss*) na execução da simulação de sinais com os parâmetros presentes na Tabela 5.1 utilizando o *Free-space path loss* como modelo de propagação.

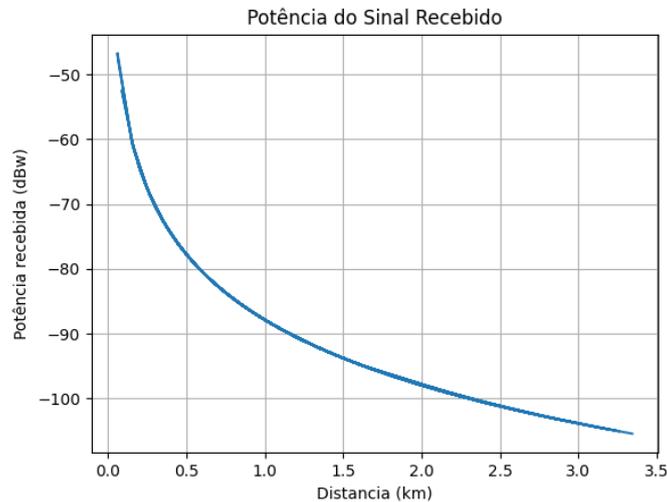
Figura 5.4 – Atenuação do sinal propagado durante simulação utilizando *Free-space path loss*.



Fonte: Do autor (2021).

O sinal atenuado transmitido pela ERB, como mostrado na Figura 5.4, reflete diretamente na potência do sinal recebido pela estação. A Figura 5.5 mostra como é o comportamento da potência recebida.

Figura 5.5 – Potência do sinal recebido durante simulação utilizando Free-space path loss.



Fonte: Do autor (2021).

Desta forma, é possível ver que conforme a distância entre a ERB e a estação móvel tende a aumentar, a perda pelo caminho também cresce de maneira logarítmica. Justo disto, pode-se ver que quanto maior a distância entre estação móvel e a ERB, menor será a potência recebida.

A consideração da altura do terreno durante a execução da simulação foi um passo crucial para a obtenção de resultados mais realistas. A Figura 5.6 mostra como está disposto o mapa topográfico da região utilizada nas simulações, a região de Lavras com ênfase maior no campus da UFLA e regiões próximas. A mesma, mostra os valores mínimos e máximos de elevação do terreno variando entre 803 a 992 metros.

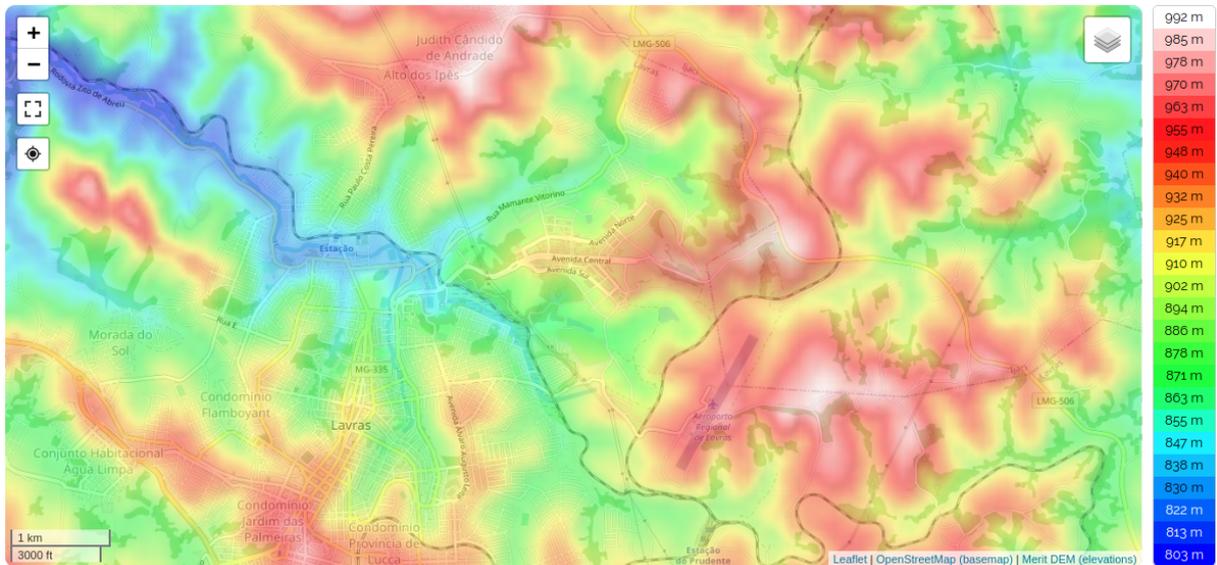
Dessa forma, utilizando os dados informados de configuração do cenário apresentados na Tabela 5.1, adicionando também os parâmetros de altura e desta vez utilizando o modelo de propagação COST231-Hata, a Figura 5.7 mostra exatamente como é o resultado gráfico obtido da simulação.

As próximas subseções descrevem como é realizada a otimização de uma ERB existente e também efetuado a sugestão de pontos ideais utilizando a meta-heurística.

5.1.3 Buscando melhores pontos com a meta-heurística

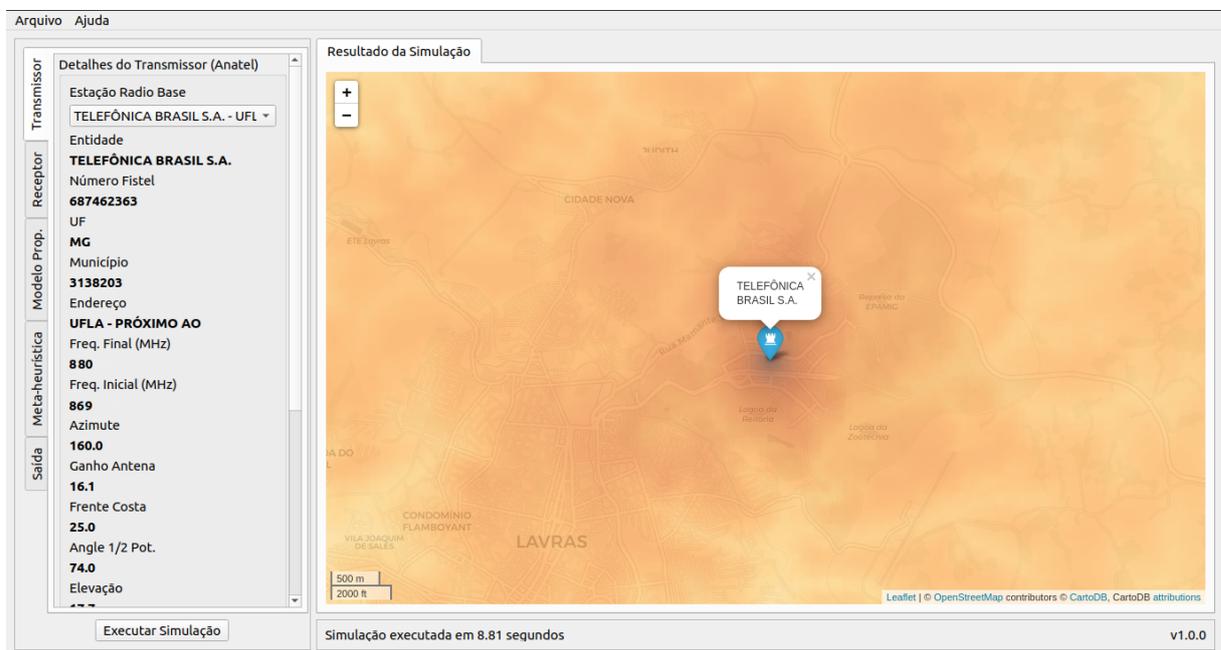
Nos passos iniciais da meta-heurística, são realizadas aceitações de novas soluções como novos vizinhos, com valores de função objetivo inferiores se comparados com a ótima encontrada, e a probabilidade para obtenção destes vizinhos segue diminuindo e tendendo a ser zero no decorrer das fases finais. Esse comportamento faz com que o *Simulated Annealing* saia de soluções consideradas como ótimas locais. Desta forma, a meta-heurística parte de uma solução inicial e depois segue gerando um

Figura 5.6 – Mapa topográfico da região utilizada nas simulações.



Fonte: (MAP, 2021).

Figura 5.7 – Propagação de sinais considerando a altura do terreno utilizando modelo de propagação COST231-Hata

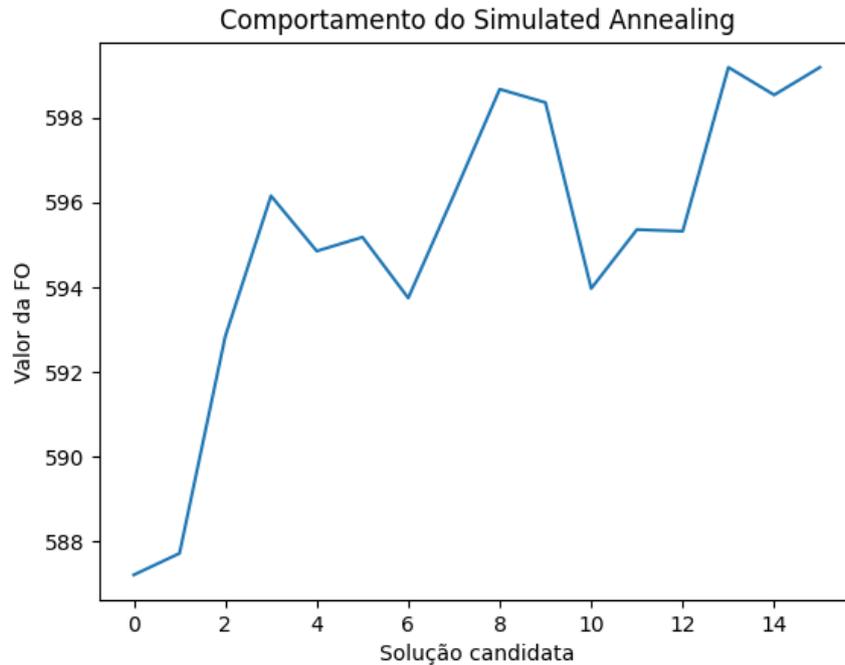


Fonte: Do autor (2021).

conjunto de soluções candidatas controladas pelo fator de esfriamento, até atingir a sua convergência em uma solução estável.

A Figura 5.8 exibe um exemplo de como é o comportamento do *Simulated Annealing* durante uma execução do algoritmo realizando a busca do ótimo global.

Figura 5.8 – Valores da função objetivo durante execução.



Fonte: Do autor (2021).

O processo de busca exibido na Figura 5.8 é de suma importância para a análise das soluções encontradas pelo *Simulated Annealing* durante o seu método de busca por soluções ótimas. Tal figura é exibida ao final da execução do algoritmo junto a mais parâmetros da simulação.

A seguir, é tratado como é realizado a estratégia utilizada para a busca de um novo vizinho durante a exploração do espaço de busca.

5.1.4 Busca de solução vizinha

Na meta-heurística utilizada neste trabalho, como visto na Seção 2.5, o termo *Annealing* se refere a um processo térmico que começa pela técnica de cozimento (no estado líquido) a uma alta temperatura, seguido pela lenta e gradativa diminuição da temperatura, até que o ponto ótimo (de solidificação do material) seja atingido, isso quando o sistema atinge um estado de energia relativamente estável.

A definição de um novo vizinho durante a execução da meta-heurística está baseada neste processo de *Annealing*. Desta forma, utilizou-se a estratégia de obter um novo ponto próximo num raio de 2% do raio inicial. Assim, o raio máximo definido para a execução das simulações foi de 3km, fazendo com que então, a distância máxima para se obter uma nova solução seja de 60 metros. Para a obtenção desse novo vizinho, são realizados cálculos em radianos considerando a circunferência da Terra e os limites máximos da área definida para a realização da simulação.

A seção a seguir, descreve sobre o conceito e definição de áreas específicas na ferramenta.

5.2 Definição de áreas específicas

Como comentado na Seção 5.1.2, é definida uma área sendo o espaço de simulação. A fim de melhorar ainda mais a solução e fazer com que o *Simulated Annealing* venha convergir para uma solução mais próxima do ótimo e ainda favorecer determinada região, foi implementada uma estratégia de definição de áreas específicas. Estas áreas, nada mais são do que regiões geográficas que possuem uma maior prioridade de alocação, fazendo com que essas localidades se tornem mais propensas terem uma cobertura de sinal melhor com a solução final proposta.

A área específica está comportada dentro da área principal do espaço de busca, sendo então a específica uma subárea contida dentro da área principal.

O cálculo da função objetivo do *Simulated Annealing* foi adaptado para considerar e reconhecer quando o ponto a ser calculado a potência recebida, está contido na sub-área específica. Para cada ponto dentro do espaço principal de simulação em que é calculado a potência recebida, é realizado a verificação se tal ponto específico está contido dentro das coordenadas perimetrais previamente informadas da área específica. Caso o ponto em questão esteja dentro da área a ser priorizada, foi realizado o acréscimo da potência recebida. O acréscimo da potência foi em 10%, fazendo com que a região específica tenha valores de potência recebida maiores e com um valor factível de se utilizar na vida real.

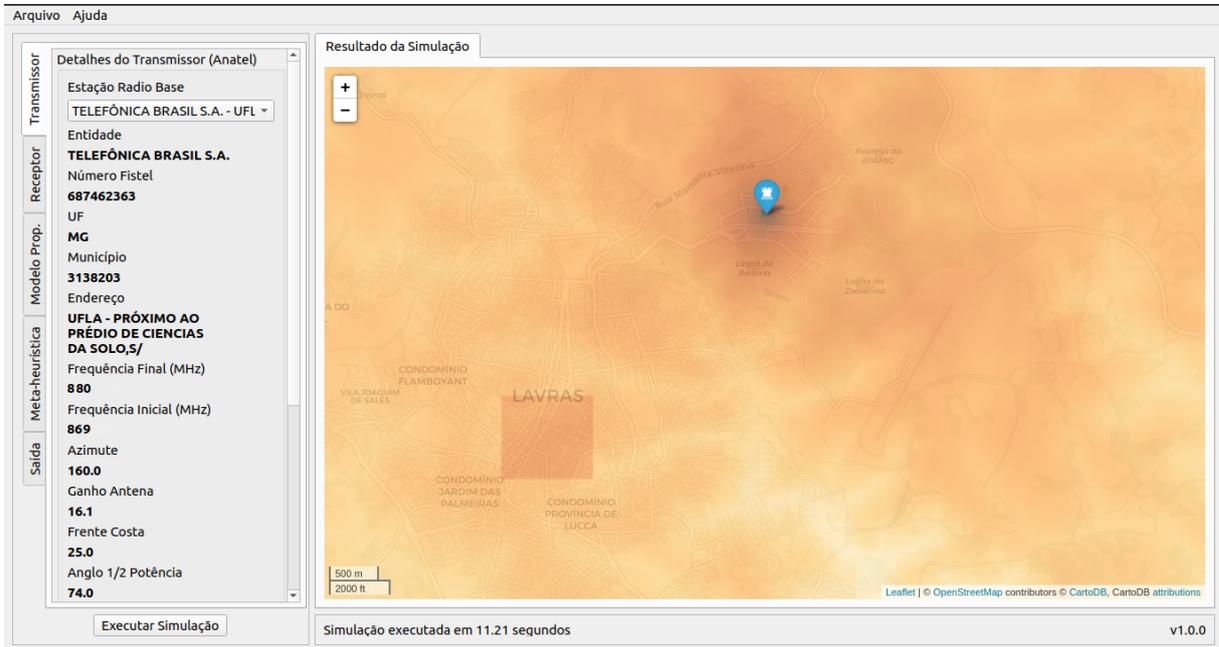
A Figura 5.9 mostra de uma forma simples como é representado o espaço de busca quando se considera áreas específicas durante a simulação da propagação de sinais.

A área especificada como prioritária na Figura 5.9, foi informada manualmente antes da execução da busca de uma solução. A diferença de cor que pode ser vista pela Figura, se ocorre pelo acréscimo dos 10% do valor da potência recebida, como dito anteriormente.

Tal estratégia se mostrou promissora, pois faz com que o *Simulated Annealing* valorize as áreas específicas que realmente têm a necessidade da cobertura do sinal e tende a deixar de explorar determinadas áreas que não contem civilização ou tem menos necessidade de uma boa qualidade do sinal.

Seguindo o mesmo propósito de sugerir configurações para serem utilizadas no momento de instalação da ERB, se realizou também um estudo com relação à altura de instalação da antena e potência de transmissão. Tal estratégia está descrita na seção seguinte.

Figura 5.9 – Representação do espaço de busca com áreas específicas.



Fonte: Do autor (2021).

5.3 Otimização dos parâmetros de altura e potência

Afim de obter resultados que possam ajudar ainda mais na implantação de uma nova ERB, foi implementadas duas modificações junto à meta-heurística. O primeiro ajuste foi a definição de áreas específicas onde o intuito é valorizar determinadas áreas definidas pelo usuário que necessitam de mais atenção e uma melhor qualidade do sinal. A segunda adaptação é relacionada à altura da antena em que a ERB ficará instalada e da potência. Durante a exploração de uma nova solução, além da potência recebida, o *Simulated Annealing* realiza uma busca também de uma altura que favoreça a potência recebida na região em volta da antena.

As definições mais detalhas sobre as modificações realizadas estão descritas na subseções seguintes.

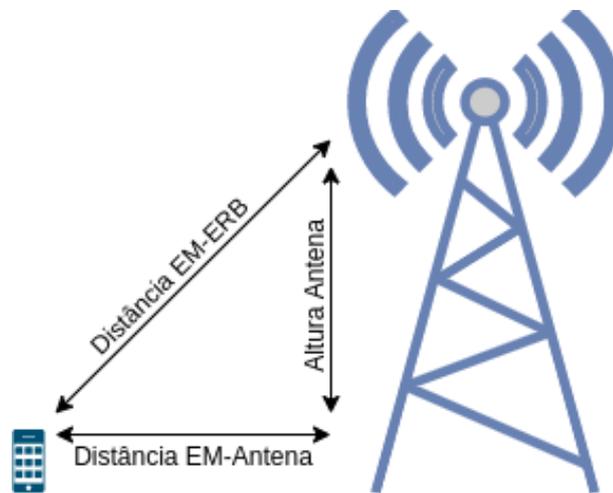
5.3.1 Definição de alturas ideais

De acordo com a base de informações Anatel utilizada no desenvolvimento deste trabalho, as ERBs brasileiras cadastradas estão alocadas em antenas com alturas variando entre 10 a 80 metros. Pode-se ver que existe uma variação bem grande das alturas. Um dos possíveis motivos desta variação pode-se dar pelas também grandes variações presentes no terreno. Caso a localidade escolhida para a alocação seja num local mais elevado, é bem provável de que a altura da antena seja mais reduzida.

Em casos que queremos abranger uma área maior de cobertura, aumentar a altura da antena nem sempre é uma boa solução. Pode haver casos em que aumentar a altura da antena apenas aumentará a distância entre a ERB e a estação móvel. Por exemplo, considerando o princípio básico do Teorema de Pitágoras, podemos afirmar que quanto maior a distância entre a antena e a estação móvel ou a distância do solo com a ERB, maior será a distância da da ERB com a estação móvel.

A Figura 5.10 deixa mais claro como é a relação destas distâncias com a altura da antena.

Figura 5.10 – Relação da distância da ERB com a Estação Móvel.



Fonte: Do autor (2021).

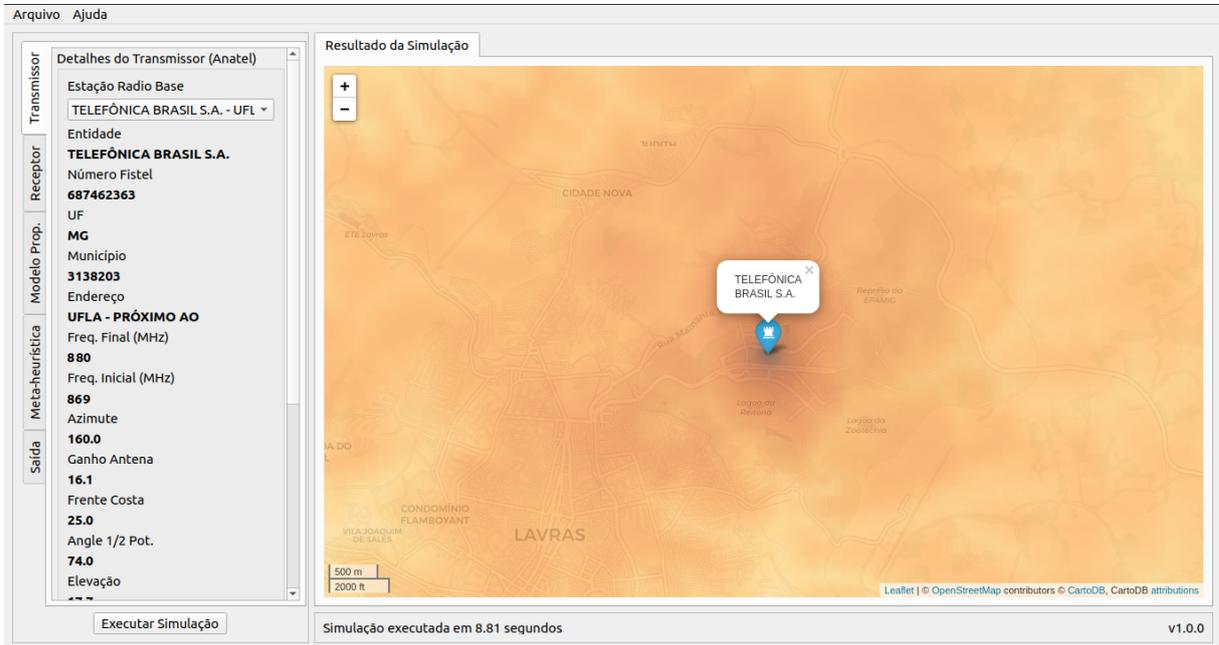
Como mostrado na Figura 5.10 e as três distâncias descritas anteriormente, obtemos o que podemos chamar de triângulo pitagórico. Tal triângulo, quando aplicado junto ao teorema, nos mostra que quando se aumenta o valor do cateto oposto (altura da antena), maior será o valor da hipotenusa (distância entre a ERB e a estação móvel). A 5.1 descreva a relação das distâncias com relação à altura da antena.

$$Distância_{EM\ ERB} = \sqrt{(Distância_{EM\ Antena})^2 + (Altura_{Antena})^2} \quad (5.1)$$

Deste modo, foi realizado uma modificação ao *Simulated Annealing* para que o mesmo considerasse alturas diferentes para a antena em um determinado ponto quando estivesse explorando o espaço de busca. A estratégia utilizada se trata em simular a propagação de sinais com quatro alturas diferentes além da altura original, sendo duas alturas para baixo e duas alturas para cima da altura fornecida pela base da Anatel. As alturas inferiores sugeridas se dão a 15% e 30% da altura de referência e as alturas superiores também são dadas a 15% e 30% da altura original.

Na Figura 5.11 é possível ver uma solução proposta pelo o algoritmo *Simulated Annealing* considerando alturas diferentes para cada posição simulada.

Figura 5.11 – Propagação de sinais considerando altura ideal da antena.



Fonte: Do autor (2021).

A Tabela 5.2 contém os valores obtidos pela simulação exibida na Figura 5.11 utilizando o modelo de propagação COST231-Hata.

Tabela 5.2 – Resultado obtido pela busca de alturas ideais utilizando COST231-Hata.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	COST231-Hata
Solução Inicial (lat, lng)	(-21.226219, -44.978219)
Valor Função Objetivo Solução Inicial	593.24
Solução Final (lat, lng)	(-21.226244, -44.978407)
Valor Função Objetivo Solução Final	696.81
Altura Ideal pela Solução Final	72.8 metros

Fonte: Do autor (2021).

Pode-se notar que o valor de Função Objetivo Final descrito pela Tabela 5.2 possui uma diferença relativamente distante da apresentada inicialmente. Essa solução proposta mostra que mais pontos dentro do espaço de busca definido são factíveis e poderiam ser considerados como válidos para a instalação de uma nova ERB.

A realização de uma pequena modificação no algoritmo, como simular alturas diferentes para um determinado ponto, pode ter um resultado significativo quando se trata da instalação de uma nova ERB. A decisão de se alocar uma ERB em uma altura além do ideal, pode resultar em um raio de abrangência de sinal menor do que o esperado e, definir a alocação com uma altura muito inferior, pode fazer com que seja necessário mais antenas do que o planejado.

Sendo assim, como mostrado nas simulações anteriores, podemos dizer que aumentar a altura sem alterar qualquer outra configuração da ERB (como por exemplo a potência de transmissão) não significa que a conectividade ou qualidade do sinal é proporcionalmente melhor. Desta forma, a seguir é descrito o métodos utilizado para a definição de potências ideais.

5.3.2 Definição de potências ideais

Seguindo o mesmo princípio apresentado na Seção 5.3.1, buscou-se otimizar um parâmetro essencial para a propagação dos sinais de rádio, esse parâmetro é a potência de transmissão. Tal parâmetro merece atenção pelo fato de que o mesmo influencia diretamente na energia necessária para o funcionamento da ERB. A potência de transmissão, quando calculada com mais cuidado e atenção, pode trazer um grande benefício a longo prazo relacionado à economia de energia.

A estratégia utilizada é similar a usada para a otimização das alturas. Esse procedimento consiste em simular a propagação de sinais utilizando quatro potências de transmissão diferentes além da altura original. Destas potências, como na estratégia de alturas ideais, duas são com valor inferior e duas possuem valores cima da potência informada pela base da Anatel. As potências inferiores sugeridas também se dão a 15% e 30% da potência de referência da ERB e as potências superiores são dadas a 15% e 30% do valor original.

A Tabela 5.3 contém os valores obtidos pela simulação buscando otimizar a potência de transmissão utilizando o modelo de propagação COST231-Hata.

Tabela 5.3 – Resultado obtido pela busca de potências ideais utilizando COST231-Hata.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	COST231-Hata
Solução Inicial (lat, lng)	(-21.226219, -44.978219)
Valor Função Objetivo Solução Inicial	593.24
Solução Final (lat, lng)	(-21.226244, -44.978407)
Valor Função Objetivo Solução Final	699.042
Altura Ideal pela Solução Final	47.6 metros
Potência Ideal pela Solução Final	78.0 Watts

Fonte: Do autor (2021).

A Tabela 5.3 mostra em números que se utilizada a otimização da altura, pode-se obter resultados em que não há a necessidade de usar valores de altura altos com a localização proposta pela meta-heurística. Essa afirmação é validada quando se compara com os valores apresentados na Tabela 5.2 e pode-se notar que não há a necessidade de se usar a altura total disponível da antena para se obter uma boa cobertura do sinal. A Tabela 5.3 mostra que é uma solução factível ao utilizar o menor valor da altura disponível com o acréscimo de 30% da potência de transmissão. Neste caso, mais execuções da meta-heurística podem ser realizadas a fim de obter resultados com o valor de potência de transmissão inferior.

Outro fato relevante que pode se observar diante da simulação realizada é que o valor da altura da antena tem um peso menor na solução, ou seja, o ganho maior obtido vem do acréscimo no valor da potência de transmissão. Tal fato pode se dar porque o parâmetro de altura pode ser influenciado pela elevação do terreno dentro do espaço de busca.

Mais validações relacionadas a altura e potência de transmissão em conjunto com outros modelos de propagação são realizados na seção seguinte.

5.4 Resultados experimentais utilizando diferentes modelos de propagação

Para a realização dos testes e execução das simulações, foram utilizadas três modelos apresentados neste trabalho. São os três modelos respectivamente: *Two-rays ground reflection*, COST231-Hata e o Hata Path Loss.

Tais modelos foram escolhidos pela facilidade de implementação, grande quantidade de trabalhos presentes na literatura, por considerarem a potência e altura e também por se tratarem de modelos consolidados. Os parâmetros comuns utilizados nas simulações dos modelos de propagação contendo a configuração do receptor, transmissor, potências e alturas disponíveis podem ser vistos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros gerais do cenário.

Parâmetro	Valor
Entidade	TELEFÔNICA BRASIL S.A.
Potência de transmissão ERB	60W
Altura antena ERB	56m
Frequência de Operação	869 - 880MHz
Altura antena EM	1m
Ganho antena EM	1 dBi
Sensibilidade EM	-120 dB
Ambiente/Cenário	Conservador/Cidade
Alturas disponíveis (metros)	39.2, 47.6, 56, 64.4, 72.8
Potências disponíveis (Watts)	42, 51, 60, 69, 78

Fonte: Do autor (2021).

Os valores dos parâmetros de referência utilizados para a execução das simulações utilizando o *Simulates Annealing* podem ser visto na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros da meta-heurística utilizada para a busca.

Parâmetro	Valor
Raio máximo de Perturbação	60 metros
Número Máximo de Iterações	3
Número Máximo de Perturbações por Iteração	5
Número Máximo de Sucessos por Iteração	140
Temperatura Inicial	200
Alpha	15%

Fonte: Do autor (2021).

Tais parâmetros apresentados na tabela 5.5 foram definidos pensando em obter uma solução com ganho significativo na cobertura do sinal considerando a área de simulação como sendo a região de Lavras/MG.

As subseções a seguir mostram os resultados obtidos utilizando diferentes modelos de propagação.

5.4.1 Resultados obtidos utilizando modelo COST231-Hata

Definidos então os parâmetros que serão utilizados para a execução das simulações, foi realizado inicialmente as execuções utilizando o modelo de propagação COST231-Hata seguindo as restrições das equações descritas na Seção 2.4.6. Foram realizadas dez execuções do *Simulated Annealing*, utilizando um tempo próximo de oito horas, a fim de obter soluções diferentes e factíveis de parâmetros diferentes de altura e potência. Os resultados computados obtidos da simulação utilizando o modelo de propagação COST231-Hata contendo: a quantidade de execuções, potência ideal, altura ideal, valor de função objetivo e tempo de execução em segundos podem ser vistos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos utilizando COST231-Hata.

Soluções	Potência (W)	Altura (m)	Função Obj.	Temp. Exec. (seg.)
102	78.0	72.8	693.2	2938
97	78.0	72.8	698.9	2904
84	78.0	72.8	698.97	2892
94	78.0	64.4	698.88	2925
84	78.0	47.6	696.04	2898
75	78.0	64.4	693.65	2905
84	78.0	64.4	697.81	2914
82	78.0	72.8	698.81	2912
91	78.0	64.4	697.01	2915
82	78.0	47.6	696.7	2900

Fonte: Do autor (2021).

Dentre as dez execuções realizadas, a que teve melhor resultado considerando menor altura sugerida foi o resultado apresentado na última linha destacada em negrito. Este resultado mostra que não necessariamente é preciso definir uma altura com valor elevado e que existe uma solução factível que atende a necessidade de uma alocação.

Os valores da melhor solução obtida a partir das simulações apresentadas na Tabela 5.6 podem ser vistos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resultados obtidos utilizando COST231-Hata.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	COST231-Hata
Solução Inicial	(-21.226244, -44.978407)
Altura Inicial	56 metros
Potência Inicial	60 Watts
Função Objetivo da Solução Inicial	593.24
Solução Final	(-21.212673, -44.980544)
Distância da Solução Inicial	405.65 metros
Altura Final	47.6 metros (-15%)
Potência Final	78 Watts (+30%)
Função Objetivo da Solução Final	696.70 (+17.43%)

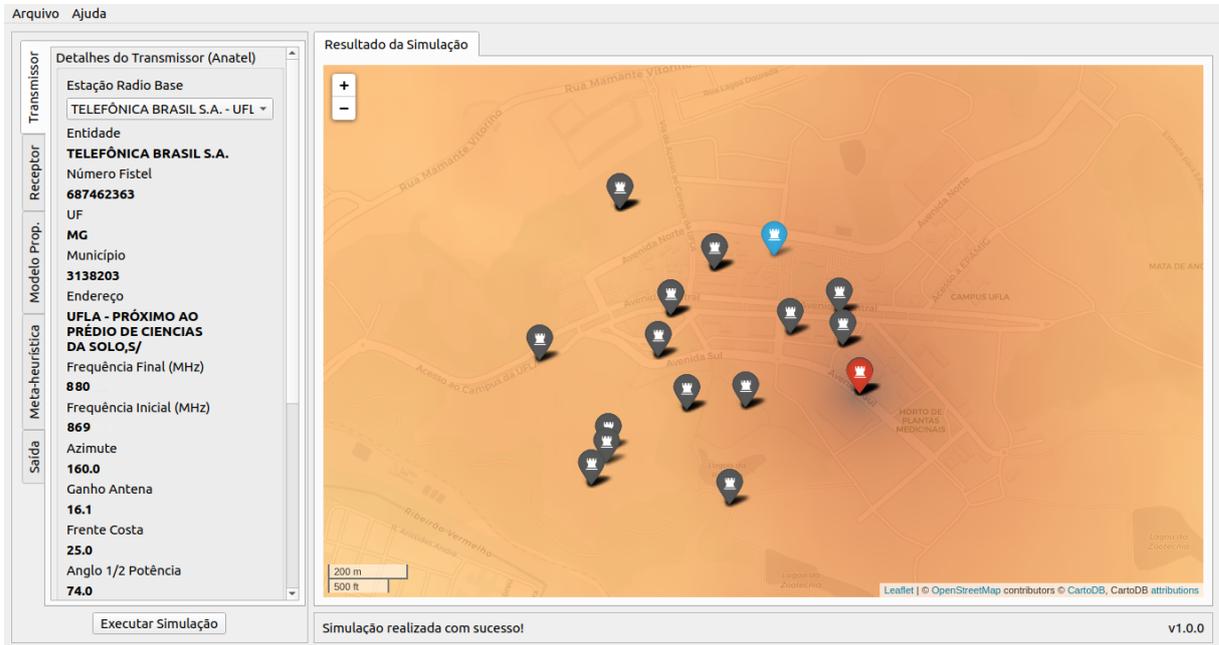
Fonte: Do autor (2021).

A Tabela 5.7 nos mostra que a o melhor ponto sugerido pela meta-heurística tem uma distância de 405.65 metros com relação à solução inicial. A altura final sugerida possui o valor de 47.6 metros, sendo o equivalente a 15% a menos do valor inicial, e um valor final de potência sugerido de 78 Watts, sendo 30% a mais que o valor inicial. Outra informação que os resultados nos mostram é que, o ponto sugerido tem uma otimização da cobertura do sinal sem precisar utilizar toda a altura da antena disponível, isso acontece apenas utilizando a elevação do terreno a favor. Outro resultado importante é, que o ponto sugerido com a simulação, tem uma melhora de 17.4% na cobertura do sinal propagado se comparado com a solução inicial.

O resultado gráfico alcançado na simulação refletindo aos valores mostrados na Tabela 5.7 e contendo as melhores soluções candidatas podem ser vistos na Figura 5.12.

O ponto azul e o ponto vermelho apresentados na Figura 5.12 representam o ponto inicial e ponto final respectivamente. Os demais pontos na cor cinza representam os pontos que foram aceitos considerados como factíveis pela meta-heurística durante a busca. Não necessariamente os pontos foram considerados como ótimos mas foram considerados, em algum momento, como uma nova solução que levasse a uma solução melhor ainda. Muitos dos pontos em cinza estão sobrepostos em uma mesma localização, porém com configurações diferentes.

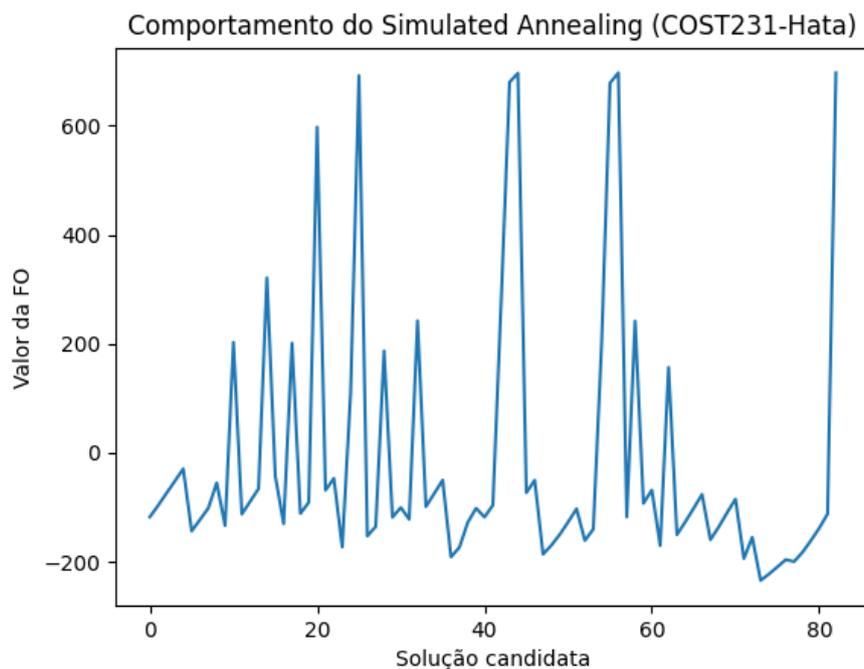
Figura 5.12 – Resultado localização sugerida utilizando modelo COST231-Hata.



Fonte: Do autor (2021).

O comportamento do função objetivo no espaço de busca durante a execução da meta-heurística pode ser visto pela Figura 5.13.

Figura 5.13 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo COST231-Hata.

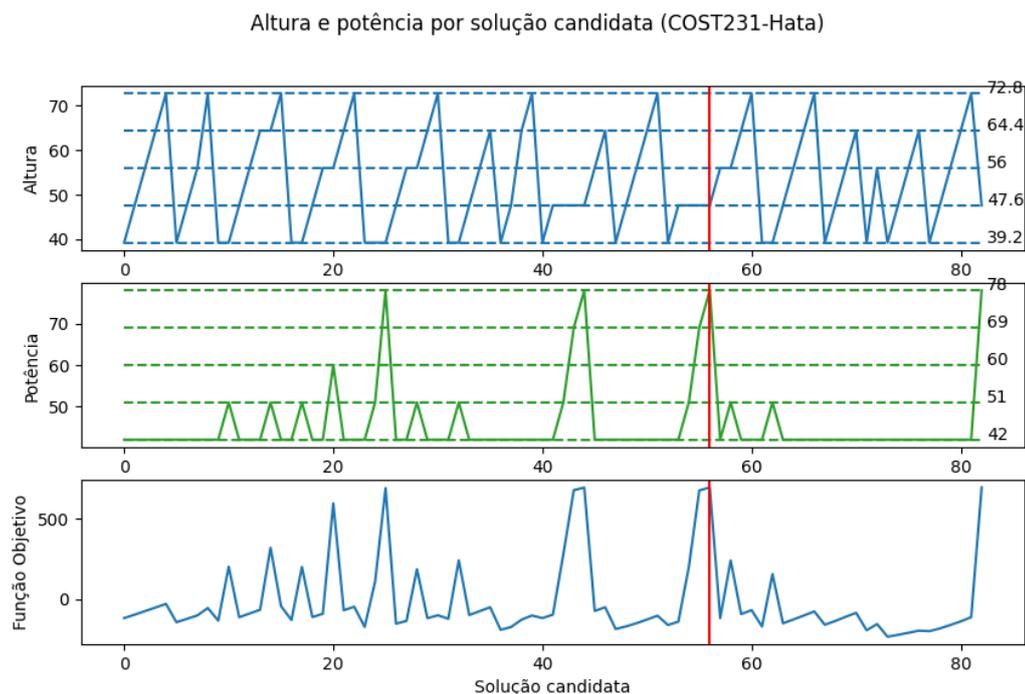


Fonte: Do autor (2021).

Pela Figura 5.13 é possível notar que o algoritmo aceitou várias soluções ruins mas mesmo assim conseguia buscar numa nova solução ótima factível dentro do espaço de busca. Tal comportamento se dá pelo critério de aceitação característico do *Simulated Annealing*, onde o mesmo optou, em alguns momentos da busca, por aceitar uma solução que fosse pior que a encontrada no momento para que encontrasse uma solução ainda melhor.

Os valores de altura e potência das soluções candidatas apresentadas na Figura 5.13 podem ser vistos pela Figura 5.14.

Figura 5.14 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo COST231-Hata.



Fonte: Do autor (2021).

Na Figura 5.14 é possível ver quais foram as configurações utilizadas para a ERB em cada solução aceita. A linha em vermelho traça qual foi o melhor ponto encontrado pela meta-heurística durante a execução descrito anteriormente na Tabela 5.7. O melhor ponto encontrado foi obtido pela solução de número 56, e por ela conseguimos ver que quais foram os valores de altura e potência quando se obteve o maior valor de função objetivo.

A subseção seguinte retrata os resultados obtidos utilizando o modelo de propagação Hata Path Loss para a busca de ponto ótimo.

5.4.2 Resultados obtidos utilizando modelo Hata Path Loss

O mesmo foi seguido para a execução da meta-heurística utilizando o modelo de propagação Hata Path Loss. Também foi realizado dez execuções com tempo próximo de nove horas e meia, a fim de obter soluções diferentes para parâmetros de altura e potência. Tais resultados obtidos das simulações podem ser vistos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos utilizando Hata Path Loss.

Soluções	Potência (W)	Altura (m)	Função Obj.	Temp. Exec. (seg.)
105	78.0	47.6	700.0	3356
87	78.0	64.4	700.0	3372
81	78.0	56.0	700.0	3408
80	78.0	56.0	699.83	3426
85	78.0	56.0	699.25	3423
92	78.0	72.8	700.0	3423
84	78.0	56.0	699.9	3499
80	78.0	64.4	700.0	3348
82	69.0	64.4	700.0	3506
77	78.0	72.8	700.0	3369

Fonte: Do autor (2021).

Dentre as dez execuções apresentadas na Tabela 5.8, duas execuções tiveram resultados satisfatórios considerando a altura e potência sugerida e seus valores de função objetivo. Tais resultados são os apresentados na primeira e penúltima linha destacadas em negrito.

Com o conjunto de soluções apresentados na Tabela 5.8, podemos ver que dentre as execuções realizadas, existe mais de uma solução que pode ser considerada próxima da ótima. A solução disposta na penúltima linha da tabela, possui valores inferiores de altura e de potência, por isso a mesma pode ser considerada ótima dentre as simulações. A primeira linha da tabela, possui parâmetros de potência e altura inferiores às demais, podendo ser também uma solução que pode ser utilizada.

Tais resultados mostram que não existe uma só solução que pode ser considerada como ótima. Outras soluções factíveis próximas da melhor sugerida podem ser utilizadas, fica a cargo do usuário avaliar qual a melhor a ser utilizada no momento da implantação.

Os valores da melhor solução obtida a partir das simulações apresentadas na Tabela 5.8 podem ser vistos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Parâmetros utilizados para busca utilizando Hata Path Loss.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	Hata Path Loss
Solução Inicial	(-21.226244, -44.978407)
Altura Inicial	56 metros
Potência Inicial	60 Watts
Função Objetivo da Solução Inicial	593.24
Solução Final	(-21.226285, -44.973485)
Distância da Solução Inicial	490.71 metros
Altura Final	64.4 metros (+15%)
Potência Final	69.0 Watts (+15%)
Função Objetivo da Solução Final	700 (+18%)

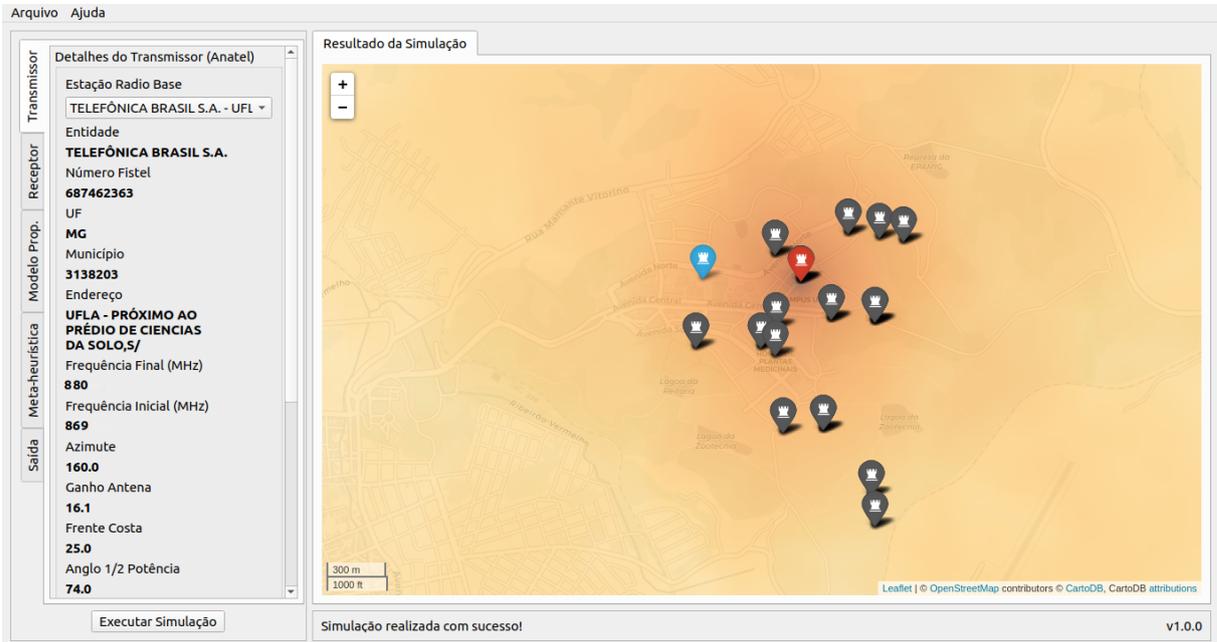
Fonte: Do autor (2021).

A Tabela 5.9 nos mostra que a altura sugerida com o ponto final, possui o valor de 64.4 metros, sendo o equivalente a 15% a mais do valor inicial, e um valor final de potência sugerido de 69 Watts, sendo também 15% a mais que o valor inicial. Podemos ver também que, o melhor ponto ótimo sugerido pela meta-heurística tem 490.71 metros de distância da solução inicial. O resultado final sugerido com a simulação, também nos dá uma melhora em 18.6% na cobertura do sinal propagado.

O resultado gráfico alcançado e relacionado aos valores apresentados na Tabela 5.9 podem ser vistos na Figura 5.15.

Os pontos nas azul e vermelho na Figura 5.15, como dito anteriormente, representam respectivamente o ponto inicial e ponto sugerido. Os pontos na cor cinza, representando os pontos aceitos pela meta-heurística durante a busca, estão desta vez, dispostos na região mais ao sul do mapa. Um dos fatores que podem ter influenciado a meta-heurística a não aceitar mais pontos ao sul do mapa, pode ser o fato de

Figura 5.15 – Resultado localização sugerida utilizando modelo Hata Path Loss.



Fonte: Do autor (2021).

que tal região possui valores topográficos de elevação inferiores se comparado com as regiões do ponto inicial e final. Em uma simulação assim, mostra que de fato, as características do terreno influenciam diretamente na escolha de um local em que o sinal se propague para regiões mais distantes.

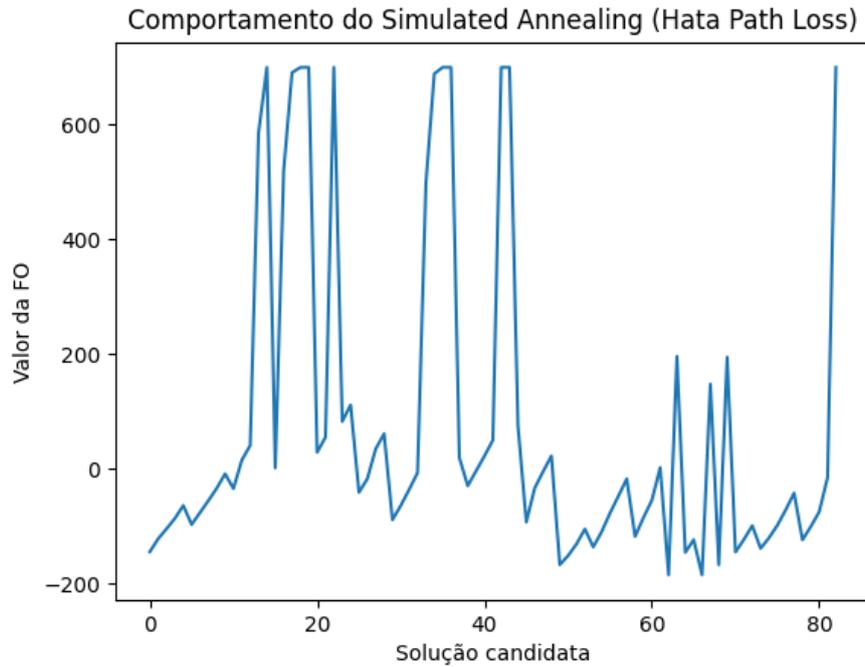
O comportamento do função objetivo no espaço de busca durante a execução da meta-heurística utilizando o modelo de propagação Hata Path Loss pode ser visto na Figura 5.16.

A Figura 5.16 mostra, que com critério de aceitação característico do *Simulated Annealing* como dito antes, a meta-heurística aceitou várias soluções com o valor de função objetivo pior que a melhor encontrada durante a exploração do espaço de busca. Mesmo realizando tais decisões, o algoritmo conseguiu buscar numa nova solução ótima factível.

Os valores de altura e potência das soluções candidatas apresentadas na Figura 5.16 podem ser vistos pela Figura 5.17.

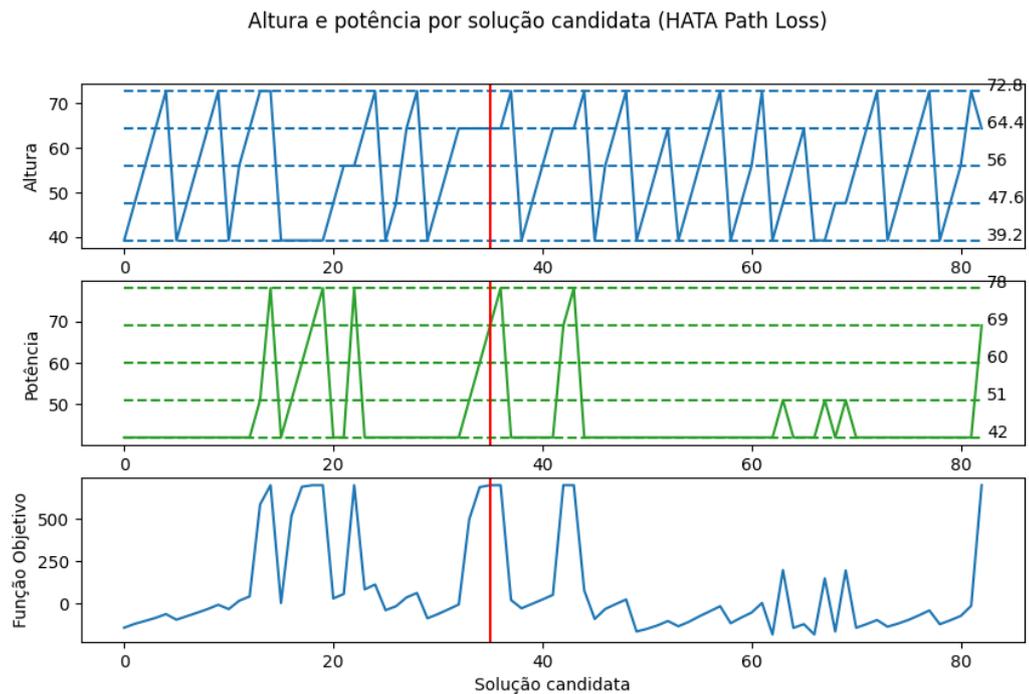
Com a Figura 5.17, pode-se ver quais foram os parâmetros de altura e potência adotadas durante a execução do *Simulated Annealing*. A linha na cor vermelha sinaliza a solução descrita na Tabela 5.9 como a melhor durante a execução da meta-heurística utilizando o modelo de propagação Hata Path Loss. O ponto contendo a melhor localização junto ao valor de função objetivo encontrado foi obtido pela solução de número 35, e por ela conseguimos ver que quais foram os valores de altura e potência mostrados na Tabela 5.9.

Figura 5.16 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo Hata Path Loss.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 5.17 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo Hata Path Loss.



Fonte: Do autor (2021).

A subseção a seguir expõe os resultados obtidos da simulação utilizando o modelo de propagação *Two-rays ground reflection* durante a busca.

5.4.3 Resultados obtidos utilizando modelo *Two-rays ground reflection*

Por fim, foi realizado também a simulação em busca de pontos ideais utilizando o modelo de propagação *Two-rays ground reflection*. O resultados vindos das execuções das simulações podem ser vistos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Resultados obtidos utilizando *Two-rays ground reflection*.

Soluções	Potência (W)	Altura (m)	Função Obj.	Temp. Exec. (seg.)
375	78.0	72.8	700.0	3628
375	78.0	72.8	699.96	3333
375	78.0	72.8	699.96	3331
375	78.0	72.8	699.98	3322
375	78.0	72.8	699.98	3327
375	78.0	72.8	699.97	3320
375	78.0	72.8	699.95	3326
375	78.0	72.8	699.98	3328
374	78.0	72.8	699.92	3328
375	78.0	72.8	700.0	3329

Fonte: Do autor (2021).

Foram realizadas as dez execuções, utilizando de aproximadamente nove horas, para se obter um conjunto de resultados diferentes das simulações. Os resultados das simulações podem ser vistos na Tabela 5.10. No conjunto de simulações, todas as execuções sugeriram os mesmos valores de parâmetros de altura e potência, porem apenas duas execuções, tiveram resultados iguais em seus valores de função objetivo. Tais resultados estão dispostos na primeira e na última linha da tabela destacadas em negrito.

Com as execuções utilizando *Two-rays ground reflection*, obtivemos valores de parâmetros de altura e potência iguais em todas as execuções da meta-heurística, com número de soluções candidatas relativamente alto se comparados com a Tabela 5.6 e a Tabela 5.8. Isso nos mostra que quando realizamos

a alteração do modelo de propagação, estamos propensos a utilizar um modelo que talvez não considere o cenário em um nível de detalhamento tão bem planejado.

Utilizamos como referência então somente a última linha da Tabela 5.10 como referência apenas por valor menor de tempo de execução, mas ciente de que pode-se utilizar a primeira linha para a determinação da implantação da ERB. Os valores da solução obtida a partir desta simulação são apresentadas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Parâmetros utilizados para *Two-rays ground reflection*.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	<i>Two-rays ground reflection</i>
Solução Inicial	(-21.226244, -44.978407)
Altura Inicial	56 metros
Potência Inicial	60 Watts
Função Objetivo da Solução Inicial	593.24
Solução Final	(-21.228067, -44.976388)
Distância da Solução Inicial	279.74 metros
Altura Final	72.8 metros (+30%)
Potência Final	78 Watts (+30%)
Função Objetivo da Solução Final	700 (+18%)

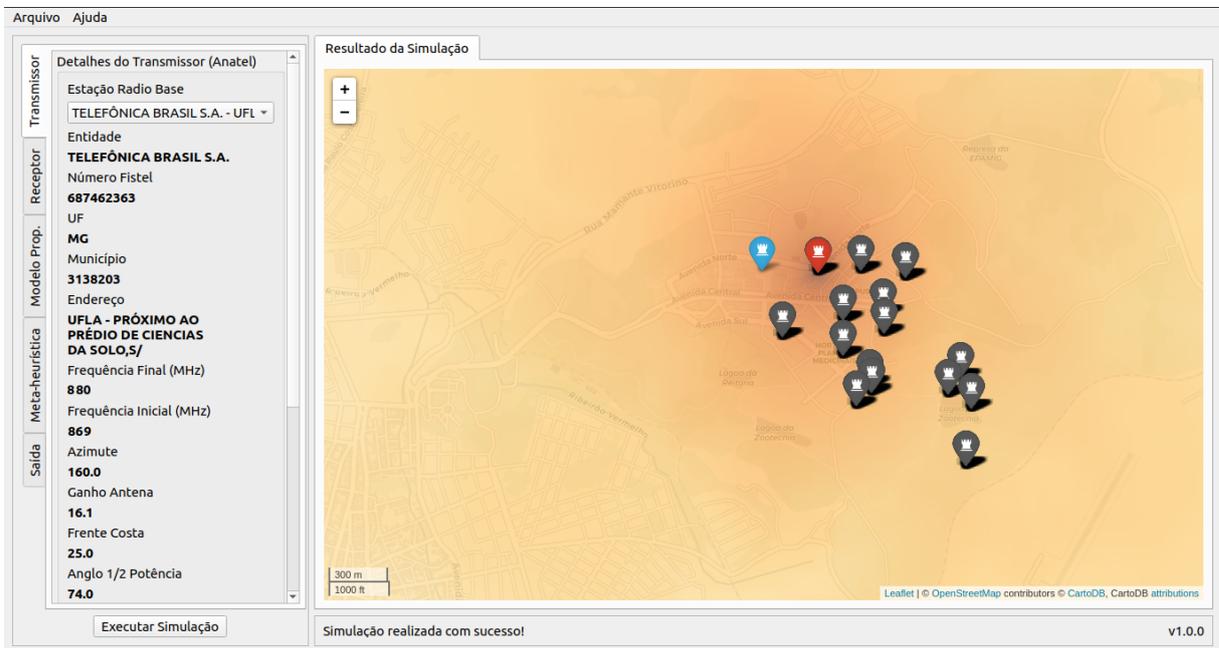
Fonte: Do autor (2021).

A Tabela 5.11 nos mostra resultados não tão promissores se comparado com os resultados obtidos de outros modelos de propagação. A altura e potência final sugerida possuem os valores 30% a cima dos valores iniciais, sendo respectivamente 72.8 metros e 78 Watts. Isso sugere que de acordo com o ponto da solução final, a instalação tenha uma altura e potência maiores do que os que a ERB já tem, fazendo com que seja usado mais recursos e energia para uma melhora de 18% da cobertura do sinal.

O resultado gráfico sob os valores apresentados pela Tabela 5.11 podem ser vistos na Figura 5.18.

Da mesma forma dos resultados apresentados anteriormente, os pontos nas cores azul e vermelho na Figura 5.18, representam respectivamente o ponto inicial e ponto sugerido. Os pontos na cor cinza, como sendo os pontos aceitos pela meta-heurística durante a busca, mais uma vez, estão dispostos na

Figura 5.18 – Resultado localização sugerida utilizando modelo *Two-rays ground reflection*.



Fonte: Do autor (2021).

região mais ao sul do mapa. O motivo que pode ter levado esse resultado pode ter sido o mesmo apresentado pela Figura 5.15: a região dos pontos em cinza possui valores topográficos de elevação inferiores quando comparado com as regiões onde os pontos inicial e final estão dispostos.

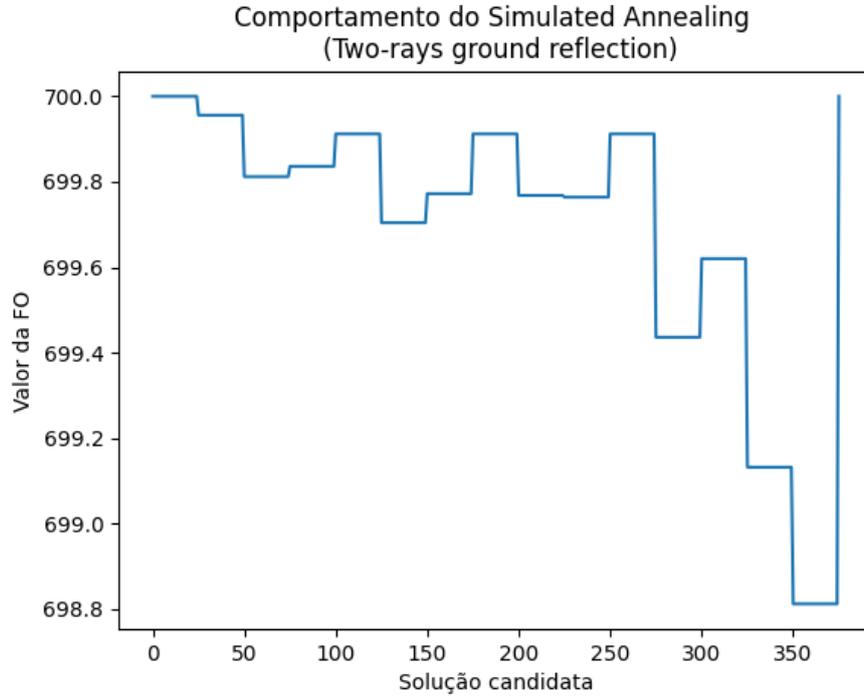
O comportamento do função objetivo no espaço de busca durante a execução da meta-heurística utilizando o modelo de propagação *Two-rays ground reflection* pode ser visto na Figura 5.19.

Com a Figura 5.19 podemos notar que conforme o espaço de busca vai sendo explorado, a meta-heurística não descobre novas soluções melhores do que às encontradas inicialmente. No caso desta execução, o critério de aceitação da meta-heurística fez com que novas soluções piores fossem aceitas a fim de encontrar uma que representasse o ótimo global, porém, tal caso não veio acontecer provavelmente pela direção da região em que as novas soluções foram sugeridas. Mesmo tomando tais decisões, o algoritmo buscou uma solução ótima factível como sugestão de instalação.

Os valores de altura e potência das soluções candidatas apresentadas na Figura 5.19 podem ser vistos pela Figura 5.20.

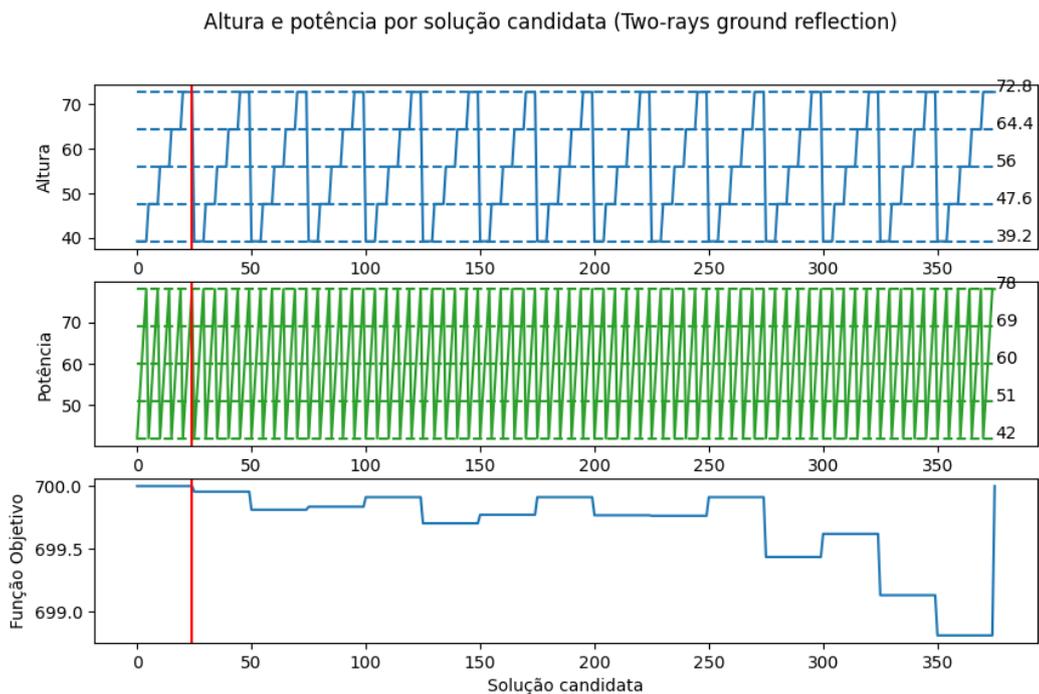
O caso apresentado pela Figura 5.20 nos mostra que durante a execução da meta-heurística foram obtidos novos pontos e que para cada um destes novos pontos, foram realizados os testes de alturas e potência para todos. O sub-gráfico contendo os valores da função objetivo, também nos mostra que não foram atingidas novas soluções melhores do que as obtidas inicialmente, o que reflete diretamente no resultado gráfico apresentado na Figura 5.18.

Figura 5.19 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo *Two-rays ground reflection*.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 5.20 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo *Two-rays ground reflection*.



Fonte: Do autor (2021).

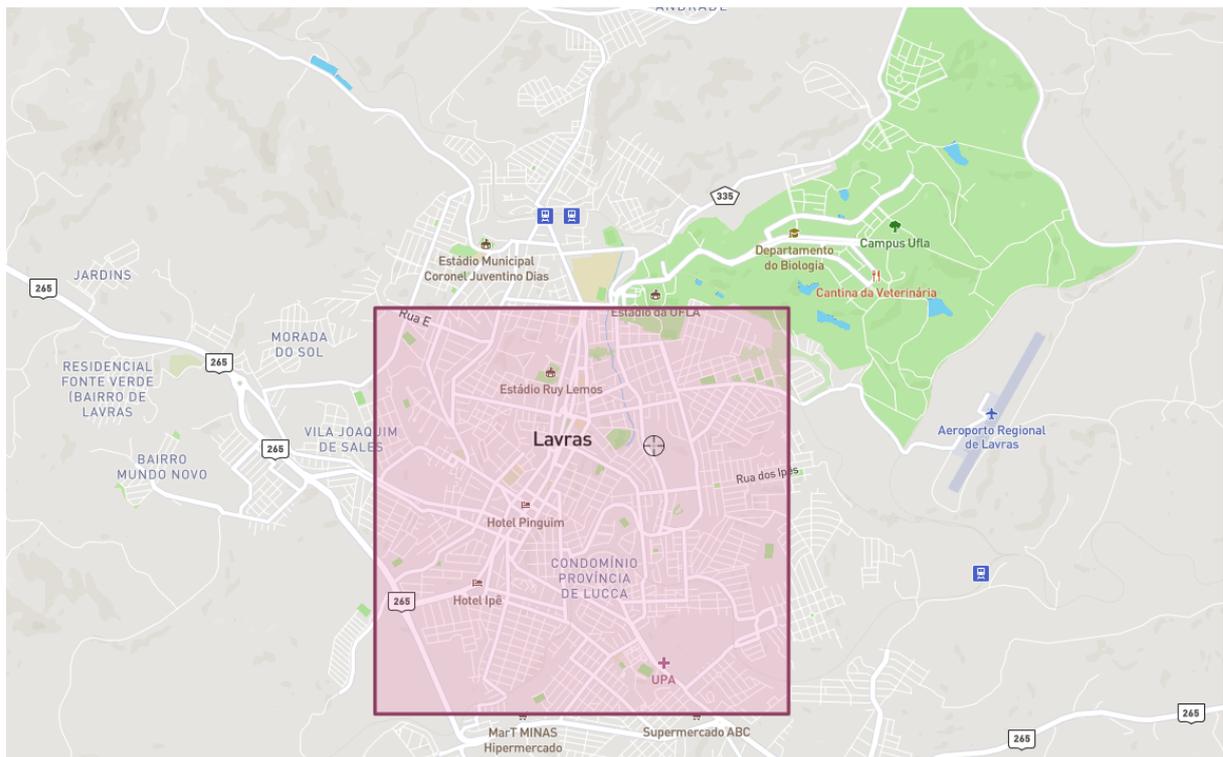
O ponto contendo a melhor localização junto ao valor de função objetivo encontrado destacado em vermelho na Figura 5.18 foi obtido pela solução de número 24, e por ela conseguimos ver que quais foram os valores de altura e potência mostrados na Tabela 5.11.

A subseção a seguir exhibe os resultados obtidos da simulação utilizando o modelo de propagação COST231-Hata durante a busca de um ponto ótimo para beneficiar uma área específica.

5.4.4 Resultado de otimização considerando área específica utilizando modelo COST231-Hata

Utilizando os mesmos parâmetros definidos na Tabela 5.5 para a meta-heurística, foi realizada uma simulação a fim de sugerir um ponto onde obtivesse a maior cobertura do sinal propagado beneficiando uma determinada área. A área escolhida para ser beneficiada com o sinal pode ser vista na Figura 5.21.

Figura 5.21 – Área específica definida para benefício do sinal.



Fonte: Do autor (2021).

Pode-se notar que a área definida exibida na Figura 5.21 cobre grande parte da cidade de Lavras, abrangendo na sua maior parte as áreas centrais, deixando os bairros mais periféricos com a prioridade inferior.

A Tabela 5.12 mostra quais foram os valores obtidos a partir da simulação executada priorizando a área demarcada na Figura 5.21.

Tabela 5.12 – Resultados obtidos utilizando COST231-Hata em otimização considerando área específica.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	COST231-Hata
Solução Inicial	(-21.226244, -44.978407)
Altura Inicial	56 metros
Potência Inicial	60 Watts
Função Objetivo da Solução Inicial	593.24
Solução Final	(-21.228004, -44.966631)
Distância da Solução Inicial	1217.33 metros
Altura Final	64 metros (+15%)
Potência Final	78 Watts (+30%)
Função Objetivo da Solução Final	699.69 (+17.94%)
Tempo total de execução da busca	3291 segundos (\simeq 55 minutos)

Fonte: Do autor (2021).

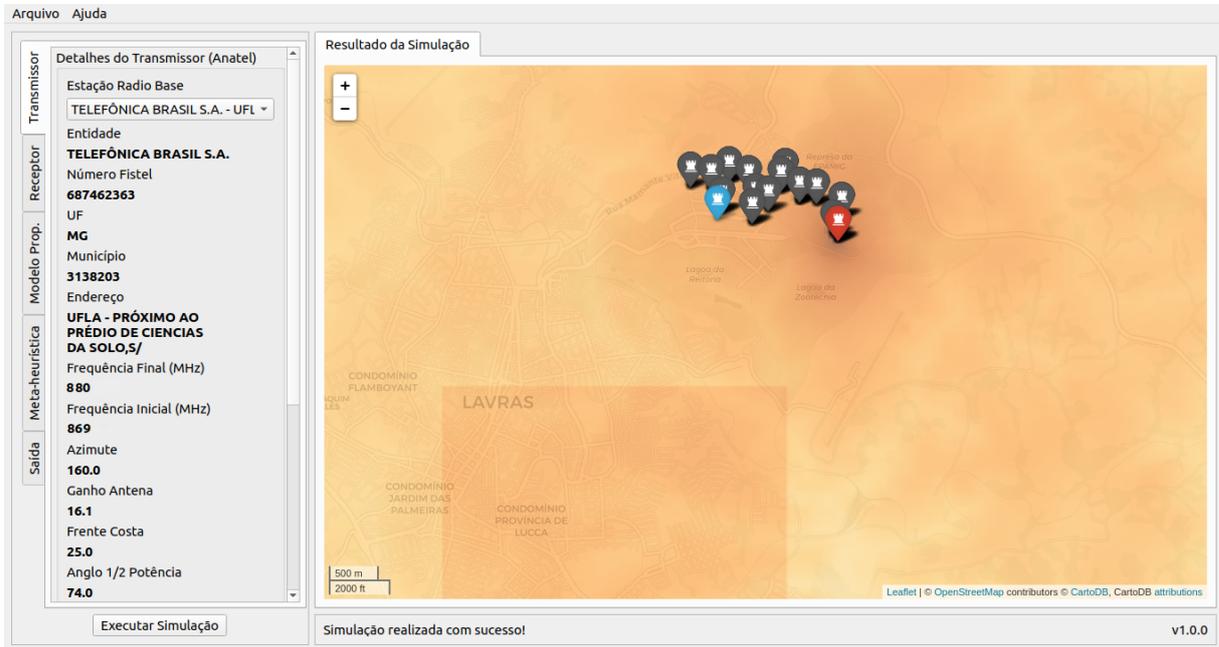
Na busca de um ponto melhor que o inicial, a meta-heurística sugeriu uma nova localidade a aproximadamente 1217.33 metros de distância da primeira execução. O resultado também mostra uma sugestão de altura sendo de 64 metros (equivalente a 15% a mais que a original) e um valor de potência de transmissão com o valor de 78 Watts (30% a mais que a original). O resultado ainda nos mostra que, o ponto sugerido tem uma otimização da cobertura do sinal sem precisar utilizar toda a altura da antena disponível, isso acontece apenas utilizando a elevação a favor.

O resultado gráfico alcançado na simulação refletindo aos valores da Tabela 5.12 e contendo as melhores soluções candidatas podem ser vistos na Figura 5.22.

A Figura 5.22 com ponto inicial e final nas cores azul e vermelho respectivamente e demais pontos em cinza como as soluções aceitas durante o espaço de busca, nos mostra que o ponto sugerido se encontra em uma região de maior elevação do terreno, fazendo com que a propagação de sinais recebida na área específica seja favorecida. Os valores da função objetivo obtidos durante a busca do ponto ótimo considerando a área específica podem ser vistos pela Figura 5.23.

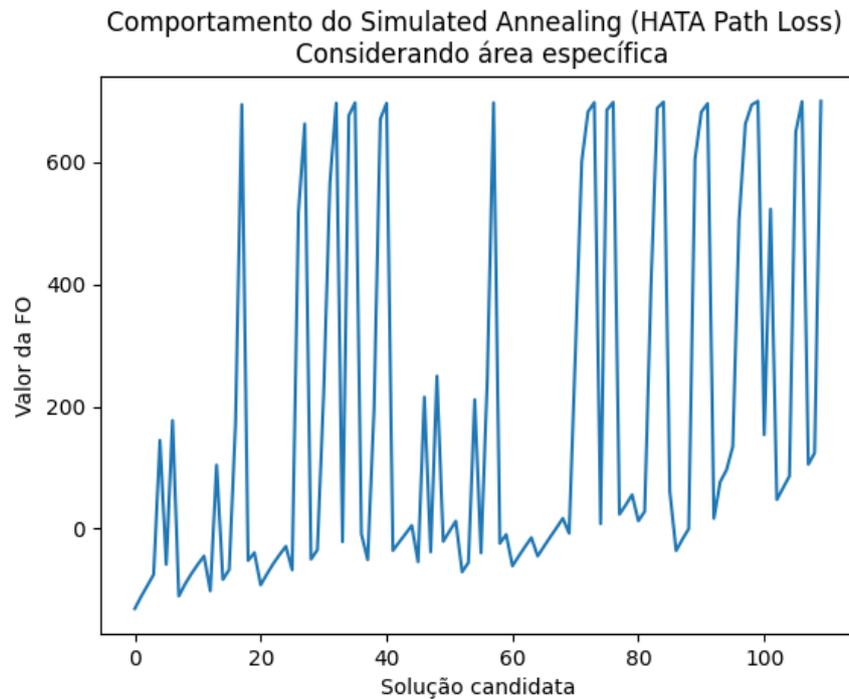
Com a Figura 5.23, podemos ver que a meta-heurística encontrou várias soluções candidatas próximas da ótima sugerida e que, a aceitação de soluções piores foi o que levou ao resultado obtido.

Figura 5.22 – Resultado localização sugerida utilizando modelo COST231-Hata considerando área específica.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 5.23 – Valores da função objetivo durante execução utilizando modelo COST231-Hata considerando área específica.



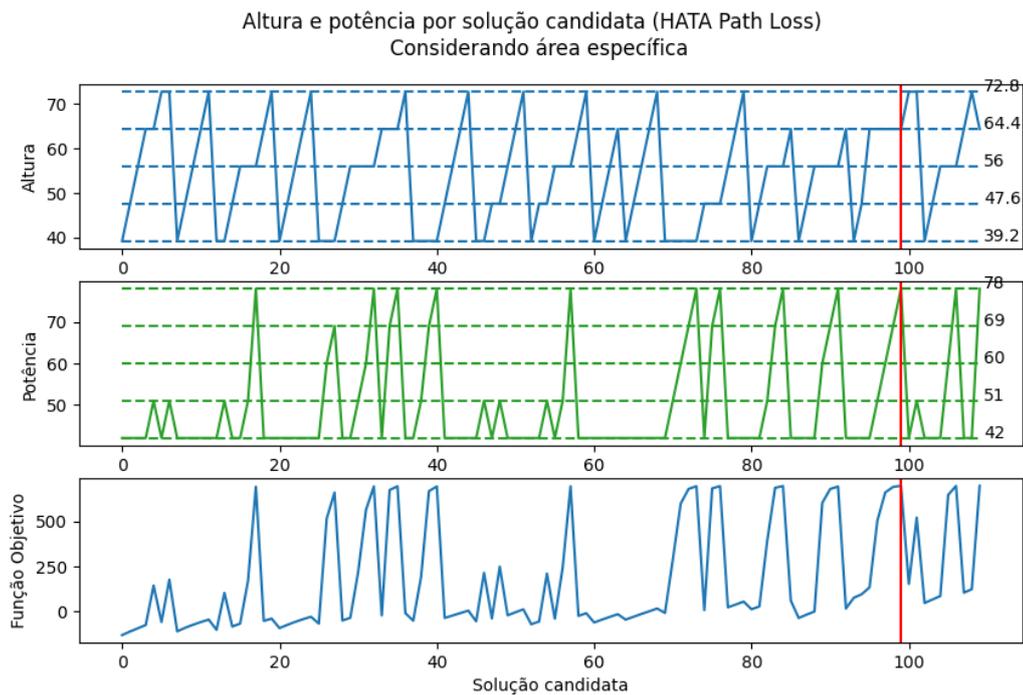
Fonte: Do autor (2021).

A aceitação de novos pontos piores, fez com que outros novos pontos com valor de função objetivo melhores fossem encontrados. Pela figura apresentada, ainda é possível ver que mesmo com as novas

soluções piores, os valores de função objetivo foram apresentando uma melhora durante a exploração do espaço de busca.

Os valores de altura e potência referentes às soluções candidatas apresentadas pela Figura 5.23 podem ser vistos na Figura 5.24.

Figura 5.24 – Valores candidatos de potência e altura durante execução utilizando modelo COST231-Hata considerando área específica.



Fonte: Do autor (2021).

Na Figura 5.24 é possível ver quais foram as configurações utilizadas de acordo com cada solução candidata aceita e também quais parâmetros empregados na melhor solução encontrada. A linha destacada em vermelho marca qual foi o melhor ponto encontrado pela meta-heurística durante a execução descrito anteriormente na Tabela 5.7. O melhor ponto encontrado foi obtido pela solução de número 99, e com os sub-gráficos de altura e potência, podemos ver que quais foram os respectivos valores junto à solução de maior valor de função objetivo.

Com os resultados apresentados na Tabela 5.12 junto da Figura 5.22 e Figura 5.24, podemos interpretar que, para que seja realizado uma melhora significativa do sinal recebido em uma determinada área, não necessariamente a ERB precisa estar disposta próxima ou dentro da área a ser beneficiada. Um método que a meta-heurística utilizou, foi de aproveitar as elevações presentes no terreno, fazendo a melhor solução convergir para uma localização de maior altitude.

6 CONCLUSÕES

A realização da pesquisa envolve áreas importantes da ciência e engenharia. Embora um dos objetivos seja a implementação de uma ferramenta, para o alcance de tal objetivo é necessário um conhecimento sólido sobre propagação de sinais de rádio frequência, tal como modelos de propagação com relacionamento ao seu espalhamento. É necessário também, um estudo que envolve meta-heurísticas de otimização, conhecimentos relacionados especificamente à redes de telefonia como também conhecimento sobre métodos e técnicas que possam ser utilizadas para a avaliação da qualidade e cobertura do sinal. Assim, todo o estudo realizado neste trabalho contribui cientificamente para novos estudos em sub-áreas da ciência, engenharia e telecomunicações.

O trabalho realizado, busca também contribuir com um estudo e planejamento para a localização de implantação das estações rádio base. O estudo aplicado realiza a simulação precedente à uma instalação real de novas ERBs, levando em consideração a potência do sinal, frequência, altura da antena e demais características do equipamento. Tal estudo, com a realização da simulação, se torna benéfico quanto à instalações reais que exigem tempo, mão de obra e equipamentos dispendiosos.

Os resultados obtidos das simulações de diferentes modelos de propagação, mostram que é crucial a escolha de um modelo para o cálculo do sinal recebido, que se comporte de forma mais realista com o cenário a ser executado. Com a simulação dos diferentes modelos de propagação, o modelo COST231-Hata se mostrou promissor. Com os resultados obtidos em nosso cenário de simulação e em conjunto com a meta-heurística *Simulated Annealing*, conseguiu sugerir pontos específicos no mapa que prometem uma cobertura de até 17.4% a mais que a área coberta atualmente utilizando valores de potência e altura diferentes dos iniciais.

O recurso de priorização de áreas específicas também se mostrou promissor, onde o mesmo conseguiu sugerir um ponto onde aproveitasse de recursos de elevação do terreno para que pudesse aumentar o raio de propagação do sinal. Com a definição da área específica, foi possível definir a priorização de uma região, que realmente possa ser beneficiada e que necessita de uma boa cobertura do sinal. Sem a utilização de um recurso como este desenvolvido na ferramenta, se torna inviável definir se uma determinada região está de fato, recebendo a devida cobertura.

Os resultados apresentados no desenvolvimento deste trabalho, também mostram que não necessariamente é preciso definir uma altura com valor elevado para a instalação de uma ERB, podendo existir uma solução factível que atenda a necessidade apenas explorando localizações diferentes e que utilizem as elevações do terreno a favor. Além do mais, tais resultados mostram que não existe uma só solução que pode ser considerada como ótima. Outras soluções candidatas com valores de função objetivo próximos da melhor sugerida podem ser utilizadas, bastando apenas o usuário avaliar qual a mais viável.

A ferramenta desenvolvida está disponibilizada de forma gratuita, utilizando Licença Pública Geral GNU - GPL em um repositório no site *github.com*¹.

6.1 Contribuições e trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se o desenvolvimento de uma heurística diferente à utilizada neste trabalho, com o intuito de comparar as soluções apresentadas. Novas técnicas também poderão ser utilizadas para a realização do cálculo da função objetivo.

Seria promissor também se a ferramenta pudesse realizar uma busca da quantidade necessária de ERBs para a cobertura de uma determinada área definida. Tudo isso atendendo à taxa de cobertura desejada na área especificada previamente.

A fim de obter simulações com um nível mais de detalhes, números com maior precisão e o resultado em um tempo menor, sugere-se também adicionar recursos de aceleração de *hardware* à ferramenta, isso quando disponível, com o propósito de realizar o aproveitamento dos recursos disponibilizados pela biblioteca CUDA e ao equipamento que está sendo utilizado para a realização da simulação.

Por fim, sugere-se também realizar o estudo e implementação de novos modelos de propagação que possam trabalhar sob as frequências de novas tecnologias que vêm surgindo, como a tecnologia 5G e suas sucessoras.

¹ <https://github.com/samueltterra22/Analysis-of-antenna-coverage>

REFERÊNCIAS

- AARTS, E.; KORST, J. Simulated annealing and boltzmann machines. New York, NY; John Wiley and Sons Inc., 1988.
- AGARWAL, A. et al. Evolution of mobile communication technology towards 5g networks and challenges. **American Journal of Electrical and Electronic Engineering**, Science and Education Publishing, v. 7, n. 2, p. 34–37, 2019. ISSN 2328-7357. Disponível em: <<http://pubs.sciepub.com/ajeee/7/2/2>>.
- AL-FALAHY, N.; ALANI, O. Coverage and capacity improvement of millimetre wave 5g network using distributed base station architecture. **IET Networks**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 8, n. 4, p. 246–255, jul 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1049/iet-net.2018.5059>>.
- ALQUDAH, Y. A. On the performance of cost 231 walfisch ikegami model in deployed 3.5 ghz network. In: **2013 The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)**. IEEE, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/taeece.2013.6557329>>.
- AMALDI, E.; CAPONE, A.; MALUCELLI, F. Radio planning and coverage optimization of 3g cellular networks. **Wireless Networks**, Springer Science and Business Media LLC, v. 14, n. 4, p. 435–447, jan 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-006-0729-3>>.
- AMORIM, L. et al. Posicionamento de estações-base em uma cidade simulada usando um algoritmo genético de chaves aleatórias enviesadas. In: SBC. **Anais do XVI Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional**. [S.l.], 2019. p. 984–995.
- ARYANTI, D. R.; HARYADI, S. Analysis of harmony in gradation index on 5g cellular network. 2017.
- ATDI. **ICS Designer by ATDI**. 2019. Disponível em: <www.atdi.co.uk/software/radio-planning/ics-designer>.
- COSTA, V. O. Alocação de antenas para rede celular de 4g utilizando algoritmos meméticos. Universidade Federal do Tocantins, 2016.
- FIGUEIREDO, T. de B. **Aplicações das tecnologias sem fio na logística**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2004.
- GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. et al. **Handbook of metaheuristics**. [S.l.]: Springer, 2010. v. 2.
- GLOVER, F. **Tabu search fundamentals and uses**. [S.l.]: Graduate School of Business, University of Colorado Boulder, 1995.
- HAN, J. K. et al. Genetic approach with a new representation for base station placement in mobile communications. In: **IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings (Cat. No.01CH37211)**. IEEE, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/VTC.2001.957251>>.
- HWANG, C.-R. Simulated annealing: theory and applications. **Acta Applicandae Mathematicae**, Springer, v. 12, n. 1, p. 108–111, 1988.
- IKEGAMI, F. et al. Propagation factors controlling mean field strength on urban streets. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 8, p. 822–829, ago 1984. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/TAP.1984.1143419>>.
- KIRKPATRICK, S. et al. Optimization by simulated annealing. **science**, Washington, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.

LEDESMA, S.; RUIZ, J.; GARCIA, G. Simulated annealing evolution. In: **Simulated Annealing-Advances, Applications and Hybridizations**. [S.l.]: InTech, 2012.

LUO, M. **Indoor radio propagation modeling for system performance prediction**. Tese (Theses) — INSA de Lyon, jul. 2013. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00937481>>.

MAP, T. **Mapa topográfico Brasil, altitude, relevo**. 2021. <<https://pt-br.topographic-map.com/maps/gn43/Brasil/>>. (Acessado em 07/06/2021).

MATHAR, R.; NIESSEN, T. Optimum positioning of base stations for cellular radio networks. **Wireless Networks**, Springer Science and Business Media LLC, v. 6, n. 6, p. 421–428, 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1019263308849>>.

MOGENSEN, P. et al. Urban area radio propagation measurements at 955 and 1845 mhz for small and micro cells. In: **IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '91: Countdown to the New Millennium. Conference Record**. IEEE, 1991. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/GLOCOM.1991.188579>>.

MÜLLER, M. K. et al. Flexible multi-node simulation of cellular mobile communications: the vienna 5g system level simulator. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, Springer Nature, v. 2018, n. 1, set 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/s13638-018-1238-7>>.

NASEEM, Z.; NAUSHEEN, I.; MIRZA, Z. Propagation models for wireless communication system. **signal**, v. 5, n. 01, 2018.

NIMAVAT, V. D.; KULKARNI, G. R. Simulation and performance evaluation of gsm propagation channel under the urban, suburban and rural environments. In: **2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT)**. IEEE, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICCICT.2012.6398137>>.

OBSERVATION, E. R.; CENTER, S. E. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global**. U.S. Geological Survey, 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>.

PANWAR, N.; SHARMA, S.; SINGH, A. K. A survey on 5g: The next generation of mobile communication. **Physical Communication**, Elsevier BV, v. 18, p. 64–84, mar 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2015.10.006>>.

PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. Wiley, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/0470841524>>.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.

RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! **IEEE access**, IEEE, v. 1, p. 335–349, 2013.

RAUCH, A. et al. Fast algorithm for radio propagation modeling in realistic 3-d urban environment. **Advances in Radio Science**, Copernicus GmbH, v. 13, n. E., p. 169–173, 2015.

REIS, A. L. **Análise Comparativa dos Modelos Empíricos de Propagação Aplicados a Sistemas Móveis Celulares**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

ROCHOL, J. **Sistemas de Comunicação sem Fio: Conceitos e Aplicações**. [S.l.]: Bookman Editora, 2018.

SAH, D. K. et al. 5g applications and architectures. In: _____. **5G Enabled Secure Wireless Networks**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 45–68. ISBN 978-3-030-03508-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03508-2_2>.

SCHMIDT-DUMONT, T.; VUUREN, J. H. van. Optimisation of radio transmitter locations in mobile telecommunication networks. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 27, n. 2, p. 160–176, 2016.

SHARMA, P. Evolution of mobile wireless communication networks-1g to 5g as well as future prospective of next generation communication network. **International Journal of Computer Science and Mobile Computing**, v. 2, n. 8, p. 47–53, 2013.

SILVA, V. A. d. **Modelagem computacional de canais de comunicação móvel**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004.

TECHNOLOGIES, H. **Single Voice Core, an Agile and Efficient All-In-One Voice Network for the 5G Era**. Huawei, 2020. Disponível em: <<https://carrier.huawei.com/en/industry-perspective/5g-core-network/Single-Voice-Core>>.

VIEIRA, S. T. et al. Wireless access point positioning optimization. In: IEEE. **2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)**. [S.l.], 2019. p. 1–6.

VISWANATHAN, M. Log distance path loss or log normal shadowing model. 2013.

VORA, L. J. Evolution of mobile generation technology: 1g to 5g and review of upcoming wireless technology 5g. **Int. J. of Modern Trends in Engineer. and Research**, v. 2, n. 10, p. 281–290, 2015.

ZIMMERMANN, J.; HÖNS, R.; MÜHLENBEIN, H. Encon: an evolutionary algorithm for the antenna placement problem. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier BV, v. 44, n. 2, p. 209–226, fev 2003. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00176-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00176-6)>.