

**MATEUS NAKAJO DE MENDONÇA  
ERIC RODRIGUES PIRES**

**SISTEMA WEB PARA INSTALAÇÃO DE ERBS**

São Paulo  
2018



**MATEUS NAKAJO DE MENDONÇA  
ERIC RODRIGUES PIRES**

**SISTEMA WEB PARA INSTALAÇÃO DE ERBS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Engenheiro de Computação.

São Paulo  
2018



**MATEUS NAKAJO DE MENDONÇA  
ERIC RODRIGUES PIRES**

**SISTEMA WEB PARA INSTALAÇÃO DE ERBS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Engenheiro de Computação.

Orientador:

Prof. Dr. Bruno de Carvalho Alber-  
tini

São Paulo  
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catalogação-na-publicação

Mendonça, Mateus

Sistema Web para Instalação de ERBs / M. Mendonça, E. Pires -- São Paulo, 2018.

70 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.TELEFONIA CELULAR 2.SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA  
3.WEB SITES 4.OTIMIZAÇÃO MATEMÁTICA I.Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas  
Digitais II.t. III.Pires, Eric

Dedico à minha família e aos meus amigos, que me ajudaram e incentivaram durante a minha graduação.

-- Mateus

Dedico este trabalho à minha mãe Telma, ao meu pai Flávio, e ao meu irmão Caio, que sempre me apoiaram nos estudos e trabalhos.

-- Eric

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Bruno de Carvalho Albertini, pela orientação constante na realização deste trabalho e sincero desprendimento.

Ao Prof. Dr. Antonio Fischer de Toledo, pelos textos trazidos e pela disposição a nos ajudar.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de bacharelado em Engenharia de Computação.

Ao Prof. Dr. Wilian França Costa, pela indicação de dados utilizados no projeto.

Ao Milton Kaoru Kashiwakura e o SIMET do NIC.br, pelo interesse e auxílio no desenvolvimento.

*“O maior bem do Homem é uma mente  
inquieta.”*

-- Isaac Asimov

## RESUMO

Este projeto de formatura tem como objetivo criar um sistema capaz de calcular posições para a instalação de Estações Radiobase (ERBs) de forma que a cobertura da rede de ERBs seja maximizada. A partir da região dada como entrada, o sistema obtém os dados geográficos através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e utiliza programação heurística para a otimização da posição de instalação. Para interface com o usuário do sistema, criamos uma aplicação Web responsiva que permite selecionar a região na qual se pretende instalar uma ERB e mostra as posições ideais para instalação.

**Palavras-Chave** – Estações Radiobase, Otimização, Sistema de Informações Geográficas, Aplicação Web.

## ABSTRACT

This term paper intends to achieve a system capable of calculating the position to install cellular Base Stations (BS) in order to maximize the coverage network. For a given input region, the system collects geographic data through a Geographical Information System (GIS) and uses heuristic programming to optimize the placement position. For interfacing with the system user, we developed a responsive Web application that allows the selection of a region on which we intended to place a BS, and show the ideal points for installation.

**Keywords** – Base Stations, Optimization, Geographical Information System, Web Application.

## LISTA DE FIGURAS

1	Dados de relevo do Butantã com resolução de 1 arco-segundo. . . . .	22
2	Diagrama de Gantt. . . . .	31
3	Árvore de pré-requisitos do sistema. . . . .	32
4	Diagrama de classes das antenas. . . . .	42
5	Mapa de ERBs sem clusterização. . . . .	43
6	Mapa de ERBs com clusterização. . . . .	43
7	Projeto inicial da tela de mapas. . . . .	50
8	Projeto inicial da tela inicial. . . . .	51
9	Projeto inicial da tela de login. . . . .	52
10	Tela de mapa. . . . .	53
11	Tela de mapa com seleção de área retangular. . . . .	54
12	Tela de <i>login</i> . . . . .	54
13	Tela de <i>landing page</i> . . . . .	55
14	Cálculo da nova posição de otimização pelo método Taguchi. . . . .	59
15	Cálculo da nova posição de otimização pelo método Basinhopping. . . . .	59
16	Cálculo da nova posição de otimização pelo método SLSQP. . . . .	60
17	Método Taguchi com infraestrutura ausente. . . . .	60
18	Método Taguchi com infraestrutura ausente. . . . .	61

## **LISTA DE TABELAS**

1	Testes de mínimo global para Basinhopping. . . . .	57
2	Testes de mínimo global para SLSQP. . . . .	58
3	Testes de mínimo global para Método Taguchi. . . . .	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

**ERB:** Estação Radiobase

**MVP:** Produto Viável Mínimo (do inglês *Minimum Viable Product*)

**SIG:** Sistema de Informações Geográficas

**UX:** Experiência de Usuário

**TI:** Tecnologia da Informação

**TCC:** Trabalho de Conclusão de Curso

**FSPL:** Perda de Propagação em Espaço Livre (do inglês *Free-Space Path Loss*)

**CSV:** Valores Separados por Vírgula (do inglês *Comma-Separated Values*)

**UF:** Unidade Federativa

**CGI:** Identificador Global de Célula (do inglês *Cell Global Identifier*)

**MCC:** Código de País Móvel (do inglês *Mobile Country Code*)

**MNC:** Código de Rede Móvel (do inglês *Mobile Network Code*)

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo . . . . .	15
1.1.1	Sistema de Informações Geográficas . . . . .	16
1.1.2	Interface Web . . . . .	16
1.2	Motivação . . . . .	17
1.3	Justificativa . . . . .	17
1.4	Organização do Trabalho . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Aspectos Conceituais</b>	<b>21</b>
2.1	Representação Geográfica . . . . .	21
2.2	Propagação em Espaço Livre . . . . .	23
2.3	Algoritmos de Otimização . . . . .	23
2.3.1	Método Taguchi . . . . .	24
2.3.2	Função Escolhida . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Tecnologias Utilizadas</b>	<b>28</b>
3.1	Sistema Web . . . . .	28
3.2	Bases de Dados . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Metodologia do Trabalho</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>Especificação de Requisitos do Sistema</b>	<b>32</b>
5.1	Casos de Uso . . . . .	33
5.1.1	Atores . . . . .	33
5.1.2	Requisitos Funcionais . . . . .	33

5.1.3	Requisitos Não-funcionais . . . . .	34
5.1.4	Descrição dos Casos de Uso . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Projeto e Implementação</b>	<b>40</b>
6.1	<i>Back-end</i> . . . . .	40
6.1.1	Modelagem de ERBs . . . . .	40
6.1.2	Clusterização . . . . .	42
6.1.3	Métodos Numéricos . . . . .	46
6.1.4	Interface de Programação de Aplicações . . . . .	46
6.1.5	Bancos de Dados Externos . . . . .	47
6.1.6	Instalação de Servidor . . . . .	48
6.2	<i>Front-end</i> . . . . .	49
6.2.1	Projeto de Telas . . . . .	50
6.2.2	Leaflet . . . . .	52
6.2.3	Implementação com Vue.js e Vuetify . . . . .	52
6.2.4	Integração com <i>Back-end</i> . . . . .	55
6.2.5	Instalação de <i>Front-end</i> . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Testes e Avaliação</b>	<b>57</b>
7.1	Métodos Numéricos . . . . .	57
7.2	Cálculo da Posição Ideal para Instalação . . . . .	58
7.3	Código . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>62</b>
8.1	Conclusões do Projeto de Formatura . . . . .	62
8.2	Contribuições . . . . .	63
8.3	Perspectivas de Continuidade . . . . .	63
8.3.1	Plano de Negócio . . . . .	64

8.3.2 Dados Adicionais . . . . .	65
8.3.3 Descrição dos Casos de Uso Adicionais . . . . .	65
<b>Referências</b>	<b>66</b>
<b>Apêndice A – Casos de Uso Adicionais</b>	<b>68</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Na revolução da informação em que vivemos hoje, onde cada vez mais pessoas estão conectadas à rede, o acesso à Internet tem se tornado cada vez mais essencial no dia-a-dia, até mesmo para populações fisicamente isoladas de qualquer região urbana. Empresas de telefonia móvel consolidadas no mercado vêm se empenhando para garantir melhor acesso a mais pessoas, mas se deparam com problemas de engenharia nesta tarefa.

A extensão territorial e a densidade demográfica desigual do Brasil são dois dentre vários fatores que tornam problemas de telecomunicação mais complexos. Há a necessidade de se aumentar uma rede celular tanto em cobertura (para áreas com pouca densidade de antenas), quanto em capacidade (áreas com infraestrutura já existente, mas que não suporta a demanda local).

A dimensão deste problema fomenta um considerável potencial de mercado para empresas terceirizadas, voltadas à instalação de Estações Radiobase (ERBs) para compartilhamento ou aluguel de células telefônicas às grandes empresas de telecomunicação. Dessa forma, há uma demanda latente do mercado por ferramentas que simplifiquem e/ou automatizem a tarefa de estudo de localização de ERBs.

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste projeto de formatura é criar um produto mínimo viável (MVP) de um sistema que permita calcular posições para a instalação de antenas de telefonia de forma a maximizar o seu alcance.

Há dois requisitos principais para a realização deste sistema. A primeira envolve coletar, apresentar e utilizar dados geográficos utilizados nos cálculos de instalação de novas antenas. Isso pode ser realizado por um sistema de informações geográficas.

O segundo é que tal sistema seja baseado em uma interface prática e responsiva para os usuários, de forma a ser utilizada tanto em computadores de escritório quanto em campo,

através de dispositivos móveis. Portanto, uma interface web que supra estes requisitos é essencial para o projeto.

A seguir, abordaremos com mais detalhes os dois módulos que serão utilizados para cumprir as necessidades do sistema.

### 1.1.1 Sistema de Informações Geográficas

Um SIG (Sistema de Informações Geográficas) é um sistema computacional capaz de obter, gravar, gerir, analisar e visualizar dados geográficos. Seu uso permite tomar decisões, analisar estatísticas e resolver problemas de otimização a partir de dados geográficos. O SIG é uma base que pode ser usada tanto no dia-a-dia para encontrar lojas próximas, quanto para profissionais rastrearem padrões de migração de ave ou monitorarem desmatamento ou planejamento urbano, por exemplo.

Em nosso projeto, usamos um *framework* de SIG para gravar e exibir a posição de ERBs (Estações Radiobase) atuais, o relevo topográfico e a quantidade de consumidores atendidos na área da rede atual, segregados pela tecnologia em uso. Com essas informações, determinamos as posições ótimas de ERBs de modo a maximizar a área de cobertura do sistema de telefonia. Para tanto, aplicaremos técnicas de programação linear, uma vez que estamos diante de um problema de otimização cuja função a ser otimizada é linear em relação às variáveis de entrada.

### 1.1.2 Interface Web

Para interação dos dados geográficos e de otimização com o usuário, desenvolvemos um *front-end* Web que permite selecionar a região na qual se pretende instalar alguma ERB. Esta interface se comunica com o *back-end* do SIG, para obter e calcular os dados desejados.

O *design* é responsivo, podendo ser utilizado em plataformas *mobile* ou *desktop*, e simples, com controles que suportam uma experiência de usuário (UX) intuitiva durante a tarefa de verificar a posição ótima para a instalação de antenas em determinada área escolhida pelo usuário. Para isso, a interface exibe um mapa com as informações do SIG, que permite ao usuário selecionar uma área desejada. Os dados são calculados no *back-end* e exibidos ao usuário na tela. Para isso, o *front-end* obtém os dados e atualiza a tela dinamicamente.

## 1.2 Motivação

Com uma análise preliminar do setor, verificamos o estado atual do mercado de instalação e aluguel de torres telefônicas no Brasil, com o intuito de comparar as tecnologias utilizadas em estudos de posicionamento de ERBs. Assim, pesquisamos serviços similares da concorrência. Um dos produtos encontrados, chamado Atoll, é um *software* de planejamento de células e posições de ERBs, similar ao que desejamos desenvolver, porém com funcionalidades estendidas, como manutenção e melhoria de locais pré-estabelecidos, e parâmetros avançados de especificação das antenas, além de módulos para outras tecnologias de telecomunicação como Wi-Fi [1].

No entanto, a ferramenta é voltada à instalação urbana e análise de infra-estrutura pré-existente, sem foco em uma eventual expansão. Por isso, entendemos que há necessidade do mercado de uma ferramenta voltada à ampliação de uma rede de ERBs, e que seja de fácil uso pelos instaladores de antenas do setor comercial. A utilização de um *front-end* web também contorna os problemas relacionados à instalação de programas no computador, como dificuldades para usuários menos instruídos no uso de computadores, ou políticas de tecnologia da informação (TI) em empresas.

Um novo projeto na área de telecomunicações também pode ser de interesse ao público geral. Alguns casos de uso alternativos incluem a estimativa de posição do dispositivo pelas antenas encontradas, e a localização de antenas a partir do próprio celular do usuário. Eles permitiriam, respectivamente, uma geolocalização de baixa potência, aumentar o engajamento dos usuários na melhoria da infraestrutura em sua região, ou até mesmo avaliar alternativas dentre empresas de telecomunicação concorrentes.

## 1.3 Justificativa

Como discorrido anteriormente, nossa análise confirmou que há a necessidade de uma solução voltada ao setor brasileiro de telecomunicações que seja automatizada e simples. Para verificar a necessidade da ferramenta a ser desenvolvida, pesquisamos sobre a situação atual para o mercado de antenas e eventuais *stakeholders* que seriam beneficiados por essa ferramenta.

Como explica o presidente da consultoria Teleco, há problemas com as leis atuais para instalação de novas antenas, o que reflete em impedimentos na adoção de novas tecnologias [2]. Com a chegada do 5G no Brasil, espera-se que haja maior disposição

dos agentes de Estado por agilidade no processo de licitação de novas antenas, já que há demanda dos usuários por um acesso à Internet melhor e mais veloz. Nesse sentido, a ferramenta pode acelerar a instalação de novas antenas.

Sobre potenciais clientes, verificamos a existência de empresas no Brasil para localizar antenas, alugar terrenos para a instalação de antenas ou alugar antenas para empresas de telecomunicação. A maior parte destas empresas foca em um contexto urbano, negligenciando o interesse das empresas de telecomunicação e dos governos estaduais em uma expansão também para áreas rurais.

MyTower é um portal de locação e venda de imóveis para operadoras de telecomunicação [3]. Ele permite que o usuário cadastre seu imóvel e o anuncie para as operadoras após aprovação. O portal então faz a intermediação entre o anunciante e a operadora.

A Skysites é uma empresa que oferece soluções na área da infraestrutura de telecomunicação [4]. Ela gera um portfólio de sítios para instalação de equipamentos de telecomunicação (torres, *rooftops*), além de prover soluções personalizadas para empresas de telecomunicação e também para compartilhar torres entre diferentes empresas. Outros serviços são redes para cobertura *indoor* e pequenas ERBs para melhorar a cobertura em ambiente urbano, as *small cells*.

Dessa forma, concluímos que o MVP é essencial para garantir um diferencial de mercado entre as várias empresas que crescem nesse setor, sejam tanto atores principais como as operadoras móveis, quanto terceiros que apenas gerem antenas. A automatização desses estudos de instalação pode cortar custos em análise de risco e permitir um processo mais ágil de projeto de novas antenas.

## 1.4 Organização do Trabalho

Para o projeto de formatura, organizamos este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em oito capítulos:

- No capítulo “**Introdução**” deste trabalho, definimos o problema, a motivação da realização deste sistema, e o que buscamos alcançar neste projeto.
- No capítulo “**Aspectos Conceituais**”, realizamos a contextualização dos conceitos de suporte para a execução do trabalho e a revisão da literatura de base.
- No capítulo “**Tecnologias Utilizadas**”, listamos as ferramentas, algoritmos e dados necessários para o desenvolvimento do sistema.

- No capítulo “**Metodologia do Trabalho**”, definimos os processos e fases no desenvolvimento de funcionalidades deste sistema, como concepção, estudo, projeto, implementação e teste.
- No capítulo “**Especificação de Requisitos do Sistema**”, definimos os requisitos para o desenvolvimento do sistema.
- No capítulo “**Projeto e Implementação**”, definimos os processos de implementação das tecnologias e requisitos levantados.
- No capítulo “**Testes e Avaliação**”, estão documentados os resultados do sistema através de testes feitos em diversos níveis.
- No capítulo “**Considerações Finais**”, relatamos a experiência de projeto de TCC e questões adicionais que restaram para uma avaliação futura.



## 2 ASPECTOS CONCEITUAIS

Com o MVP definido no capítulo anterior, iremos nos aprofundar na base teórica das tecnologias para a seleção do ponto ótimo de instalação de antenas. Dentre estes aspectos, discorreremos neste capítulo sobre a representação e modelagem dos dados geográficos em SIG e os algoritmos de otimização que podem ser utilizados.

### 2.1 Representação Geográfica

Devido à complexidade imposta pelo problema de se utilizar valores geográficos, essa seção da monografia se dedicará a explicar como o SIG permite a modelagem dos diversos componentes utilizados nos capítulos subsequentes.

O Open Geospatial Consortium é uma organização sem fins lucrativos dedicada à padronização de sistemas de informações geográficas. Para a representação de dados geográficos, ela especifica tipos de representações de dados, como pontos, linhas e polígonos [5]. Estes tipos, ou geometrias, são implementados nos principais SIGs, como por exemplo o ArcGIS e a extensão PostGIS do PostgreSQL; mais especificamente, ambos utilizam a biblioteca C++ aberta “GEOS”.

A utilização de cada tipo depende do objeto a ser representado. No caso de representar ERBs, por exemplo, a única informação geográfica que precisa ser armazenada é a sua localização. Para isso, será usado o tipo **Point** – que é também o tipo mais simples da especificação, armazenando apenas as coordenadas horizontal e vertical.

Para municípios e unidades federativas, por outro lado, deseja-se representar uma área com formato arbitrário. Poderíamos usar o tipo **Polygon** – que representa um polígono por uma lista ordenada de pontos, onde o primeiro ponto deve ser idêntico ao último –, mas esta abordagem ignora dois casos: quando a área do município possui buracos (i.e. há um enclave de outro município), e quando a área do município é desconexa (por exemplo, quando é um arquipélago). Ambos os casos requerem a representação da área por mais

de um polígono; para isso, a GEOS disponibiliza a coleção de geometrias `MultiPolygon`, que também é uma geometria em si.

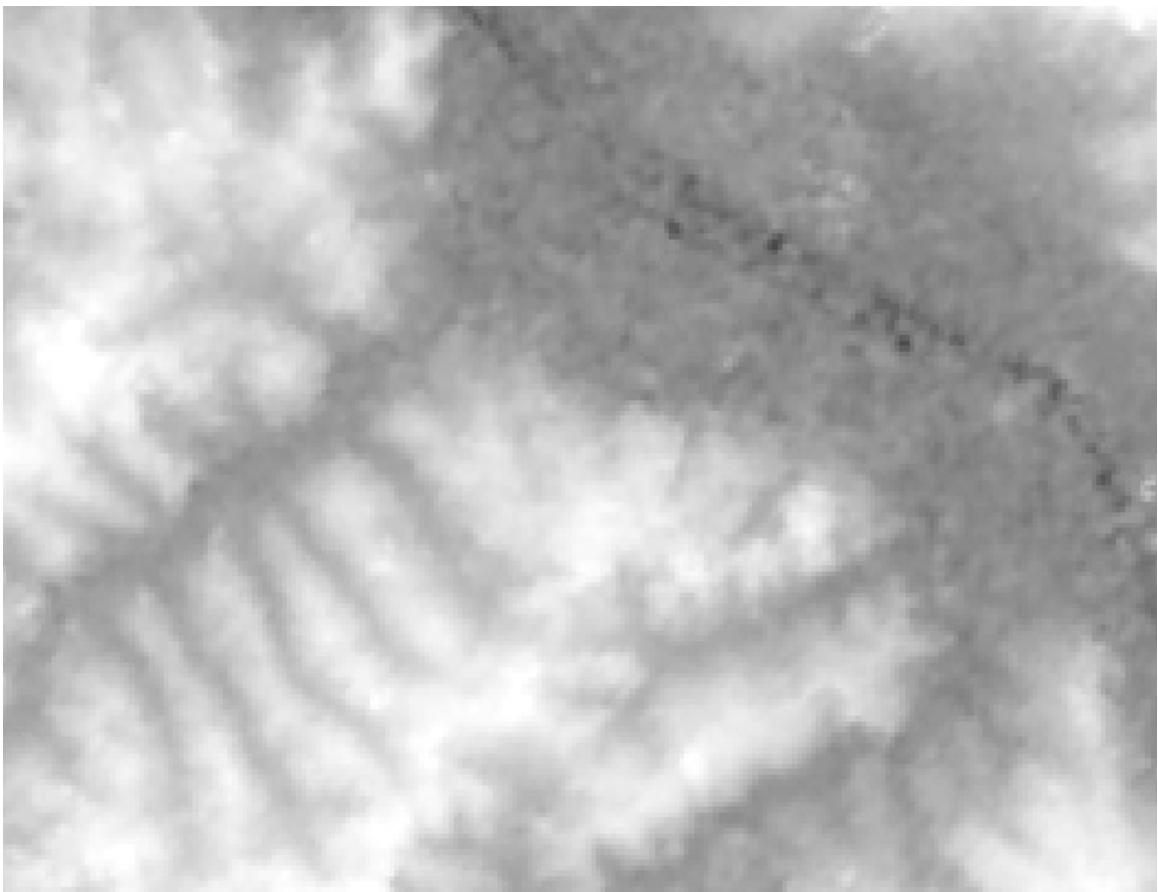


Figura 1: Dados de relevo do Butantã com resolução de 1 arco-segundo.

Por fim, outras informações que podem ser obtidas em bancos de dados externos, como população e relevo, mostram os valores como regiões no mapa. A razão para isso é facilitar a transformação dos dados vetoriais (i.e. escalares) para *raster* (i.e. imagens) na hora de exibir ao usuário. Assim, em algumas das bases descritas posteriormente nesta monografia, esses dados são disponibilizados como uma lista de tuplas “área (`Polygon`) e valor” (número de habitantes ou altitude em metros, respectivamente). Estes polígonos possuem tamanho igual à resolução da análise, que depende da metodologia usada para gerar os dados. Um exemplo de dado *raster* com múltiplos polígonos está representado na Figura 1, que possui resolução de 1 arco-segundo, o que equivale a aproximadamente 30 metros.

Para determinadas análises, como estimar a altitude em um ponto qualquer ou contar a população em uma área, pode ser mais interessante transformar esses dados em uma lista de tuplas “ponto (`Points`) e valor”, com pontos centrados nos polígonos. A razão para

isso é que estes dados ocupam menos espaço em disco quando há muita granularidade na resolução (por exemplo, altitude e população costumam variar entre quadrados vizinhos), e a execução dos algoritmos de filtro de distância e pertinência a uma área são, em geral, mais rápidos quando operando sobre esta estrutura.

## 2.2 Propagação em Espaço Livre

O modelo mais simples de transmissão de dados por antenas celulares é o modelo de propagação em espaço livre. O sinal emitido por uma fonte, como uma ERB, se propaga em uma esfera de área  $A = 4\pi d^2$ . Ou seja, com uma maior distância  $d$  da antena, a intensidade do sinal decai pelo inverso do quadrado. Podemos calcular a perda de propagação em espaço livre (*free space path loss*, ou FSPL) em função da distância e da frequência  $f$  [10]. Seja a densidade de potência  $S$  e a potência total  $P_{tx}$ , então temos:

$$S = P_{tx} \frac{1}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$

A atenuação de sinal  $R$  entre uma antena transmissora e uma antena receptora pode ser escrita como:

$$R = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi d^2}{\lambda} \right) \quad (2.2)$$

Onde  $\lambda = \frac{c}{f}$  é o comprimento de onda eletromagnética. Em decibéis, reescrevemos (2.2) como:

$$R = 32.4 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (2.3)$$

Com frequência em MHz e distância em km.

A fórmula de FSPL é útil para descrever de forma simples a atenuação do sinal recebido nos dispositivos celulares e, portanto, será utilizada neste projeto para verificar o comportamento das antenas.

## 2.3 Algoritmos de Otimização

Em consulta à literatura pré-existente sobre o problema de otimização de instalação de ERBs, nos deparamos com várias abordagens distintas para o mesmo problema, em

diferentes níveis de abstração. Há várias técnicas empregadas, desde programação não-linear a algoritmos evolutivos, e desde algoritmos de polinização a programação inteira mista. Foi realizada uma comparação das tecnologias para verificar a que mais se adequa ao nosso caso de uso.

A princípio, nos voltamos a três alternativas: LEE et al. (2015) [6] utiliza conceitos básicos de telecomunicações, através de uma fórmula para calcular a satisfação dos usuários do sistema a partir de medidas de qualidade de banda, se baseando em um algoritmo evolutivo para otimizar a cobertura da rede. Já KARULKAR & OH (2016) [7] se baseia em uma abordagem de limites geográficos impostos no processo de projeto de antenas, utilizando programação não-linear para identificar a posição ótima. Por fim, WEGMANN et al. (2011) [8] utilizam o método Taguchi – embora seja utilizado para melhorar o sinal de antenas pré-existentes no trabalho original, e não para instalar novas antenas –, descrito em detalhes a seguir.

### 2.3.1 Método Taguchi

O Método Taguchi é um método estatístico que tem como objetivo diminuir o número de experimentos necessários para se ajustar um conjunto de parâmetros e, assim, obter um ganho de desempenho no sistema. No trabalho em questão, os parâmetros a serem otimizados são as coordenadas (latitude e longitude) de cada ERB a ser instalada. Como tais parâmetros são contínuos, criamos níveis associados, que correspondem cada parâmetro a valores distribuídos uniformemente dentro do intervalo avaliado.

O primeiro passo do Método Taguchi é escolher um *array* ortogonal que possua o número de colunas iguais ao número de parâmetros analisados e possua a quantidade de níveis adequada. Um *array* ortogonal é uma tabela na qual há um número  $t$  (chamado de força do *array* ortogonal), sendo que, para qualquer seleção de  $t$  colunas na tabela, todas as tuplas aparecem o mesmo número de vezes.

Em seguida, mapeamos cada nível a um valor do parâmetro. Sejam  $\min_t$  e  $\max_t$  os valores máximo e mínimo do intervalo em estudo de um parâmetro  $x_t$ , respectivamente, e  $s$  o número de níveis escolhido.

$$V_t^{(m)} = \frac{\min_t + \max_t}{2} \quad (2.4)$$

Definimos:

$$\beta_t^{(m)} = \frac{\max_t - \min_t}{s + 1} \quad (2.5)$$

Na  $m$ -ésima iteração, a função de mapeamento é:

$$f_t^m(l) = \begin{cases} V_t^{(m)} - (s/2 - l) \cdot \beta_t^{(m)}, & 1 \leq l \leq [s/2] - 1 \\ V_t^{(m)}, & l = [s/2] \\ V_t^{(m)} + (l - s/2) \cdot \beta_t^{(m)}, & [s/2] + 1 \leq l \leq s \end{cases} \quad (2.6)$$

Onde  $s$  é a quantidade de níveis escolhida e  $l$  é o número do nível.

Depois disso, mapeamos cada valor da imagem da função objetivo para a razão sinal-ruído. A fórmula é:

$$SN_i = 10 \cdot \log_{10}(y_i^2)[dB] \quad (2.7)$$

No próximo passo, calculamos o valor médio de  $SN$  para cada parâmetro para cada nível. Para cada parâmetro  $x_t$ , o nível que tiver maior SN médio, é denotado  $V_t^{(best,m)}$

Em seguida, verificamos o critério de parada. Caso não esteja satisfeito, os melhores valores de cada parâmetro são usados como valores centrais para a próxima iteração. Além disso, o valor de  $\beta_t$  é reduzido de um fator  $\epsilon < 1$ , garantindo a convergência.

$$\beta_t^{(m+1)} = \epsilon \beta_t^{(m)} \quad (2.8)$$

### 2.3.2 Função Escolhida

No problema de otimização executado, as variáveis de entrada serão as coordenadas de latitude e longitude das antenas a serem instaladas, limitadas pelo domínio de uma área retangular a ser selecionada pelo usuário na tela. A função de saída a ser otimizada pelos algoritmos será a área de cobertura da rede composta pelas antenas atualmente instaladas, mais as antenas novas.

Adotamos que cada ERB tem área de cobertura fixa, com um raio de aproximadamente 500 metros (em graus decimais,  $\frac{1}{220}$ ). No algoritmo, definimos uma variável acumuladora, que guarda a área de cobertura total das ERBs instaladas. As bibliotecas geoespaciais, como a GEOS, oferecem funções para cálculo da união de figuras geométricas, de modo que as áreas de intersecção não são somadas múltiplas vezes; esse cálculo será feito apenas uma vez, no início do algoritmo.

Em cada iteração do método numérico, calculamos apenas a área adicionada por novas ERBs e somamos com a variável acumuladora. A área total será, portanto, o valor a ser

maximizado pelos métodos numéricos.

Uma possibilidade apontada pelo Prof. Dr. Glauber de Bona, para diminuir o domínio deste problema de otimização, seria considerar a área de cobertura das antenas com o dobro do raio (ou seja, 1000 metros ou  $\frac{1}{110}$  graus decimais), e considerar que as novas antenas poderão ser apenas instaladas nos pontos não cobertos pela soma de áreas da rede de ERBs atual. Isso garante que as novas antenas necessariamente cobrirão áreas que nenhuma outra antena cobre, mas pode gerar muitos espaços vazios entre as antenas que não são cobertos. Uma ideia seria trabalhar com valores de raio menores que os efetivamente cobertos pelas antenas reais, para diminuir o domínio de busca, e utilizar análises mais aprofundadas nas iterações de otimização.



## 3 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Anteriormente, abordamos os dois componentes principais para compor nosso sistema: uma interface Web e um *back-end* SIG. Além dessas ferramentas, utilizamos também dados específicos para o SIG na implementação de um dos algoritmos apresentados em “**Aspectos Conceituais**”. Neste capítulo, discutimos as decisões tomadas pelo grupo acerca de *framework* e bases de dados utilizadas no trabalho. Estas definições serão utilizadas no trabalho descrito no próximo capítulo.

### 3.1 Sistema Web

No projeto, utilizaremos o *framework* Django, escrito em Python. A principal razão para isso é que os integrantes já possuem familiaridade com ambos Python e Django, portanto facilitando o desenvolvimento pela transferência de conhecimentos prévios. Além disso, o *framework* possui prototipagem relativamente simples para orientação a objetos, autenticação por padrão e fácil integração com banco de dados. A integração de *front-end* com o *back-end* deverá ser feita com o módulo de API REST do Django.

O Django possui funcionalidades de SIG pelo módulo GeoDjango, que utiliza como banco de dados o PostGIS (baseado em PostgreSQL). O banco foi populado com dados públicos de localização de ERBs, relevo e densidade populacional. O Django também responsável é pelos cálculos realizados para a localização de novas antenas no mapa.

Para interação com o usuário por um mapa interativo, utilizaremos a biblioteca Leaflet, escrita em JavaScript. Ela se comunica com a base de dados pela API REST que foi desenvolvida, tanto para requisições quanto para exibições.

Optamos também pelo *framework* JavaScript conhecido por Vue para realizar o controle *single-page app* do nosso sistema, e a interface gráfica Vuetify para elaborar as telas do nosso sistema.

## 3.2 Bases de Dados

Todos os dados usados para o trabalho são provenientes de fontes abertas, e são utilizados no SIG para exibição em telas ou cálculos de otimização.

Primeiramente, estudamos o “Mapa de ERBs Brasil”, presente no portal Telebrasil [11]. Essa base contém uma lista de ERBs do Brasil de novembro de 2017 com informações de operadora, endereço, e posição geográfica de cada ERB. Essas informações são essenciais no cálculo da posição ótima da ERB para maximizar a cobertura da célula de cada operadora.

Também utilizamos a base do OpenCellID, da empresa Unwired Labs [12]. Essa base contém uma lista de ERBs do mundo inteiro, com o *Cell Global Identity* (CGI) de cada ERB. Os dados foram obtidos através da colaboração de usuários do aplicativo LocationAPI da Unwired Labs, que consiste de um serviço de geolocalização que não depende de GPS. Dessa forma, com a base da OpenCellID, podemos estimar a posição de um celular a partir das ERBs às quais ele está conectado.

Outra base de dados em estudo foi o Google Earth Engine [13], uma API específica para dados geográficos públicos da Google, como relevo e densidade populacional. Devido à extensão destes dados, e à consequente inviabilidade de armazenamento em banco próprio, foi realizada uma implementação dependente desta base através de sua API, que possui implementação em Python. Esta implementação será discutida adiante.

## 4 METODOLOGIA DO TRABALHO

Neste capítulo, discorremos sobre como foi feito o desenvolvimento do MVP apresentado na introdução.

Em uma primeira etapa, definimos com o orientador a proposta e o escopo deste projeto, propondo a pesquisa a ser realizada tanto da perspectiva de implementações do algoritmo de otimização quanto de requisitos necessários. Levantados tais requisitos no capítulo “**Especificação de Requisitos do Sistema**”, a próxima etapa se baseou em projetar a realização de cada um destes requisitos de acordo com as prioridades definidas, isto é, iniciar um processo de decisões definitivas para o andamento do trabalho.

Tomadas estas decisões, finalmente, realizou-se a prototipagem das nossas funcionalidades, dividida entre os dois integrantes do grupo de forma paralela para permitir o andamento simultâneo de diferentes partes do sistema, com reuniões frequentes entre os integrantes e o orientador para avaliar o progresso. Após certa familiaridade com os desafios colocados, iniciou-se o desenvolvimento definitivo do sistema na especificação final, etapa que levou mais tempo neste projeto.

Junto com o desenvolvimento, foi realizado o *deployment* do servidor de produção, onde os testes e as demonstrações podem ser feitos, de forma a verificar as condições reais de implementação do sistema. Ele foi atualizado a cada nova funcionalidade concluída.

Por fim, antes de realizar a apresentação do trabalho final, foi realizada uma bateria de testes para verificar o funcionamento correto do sistema após o desenvolvimento, sem a elaboração de novas funcionalidades, garantindo que continuamos dentro das nossas previsões de projeto.

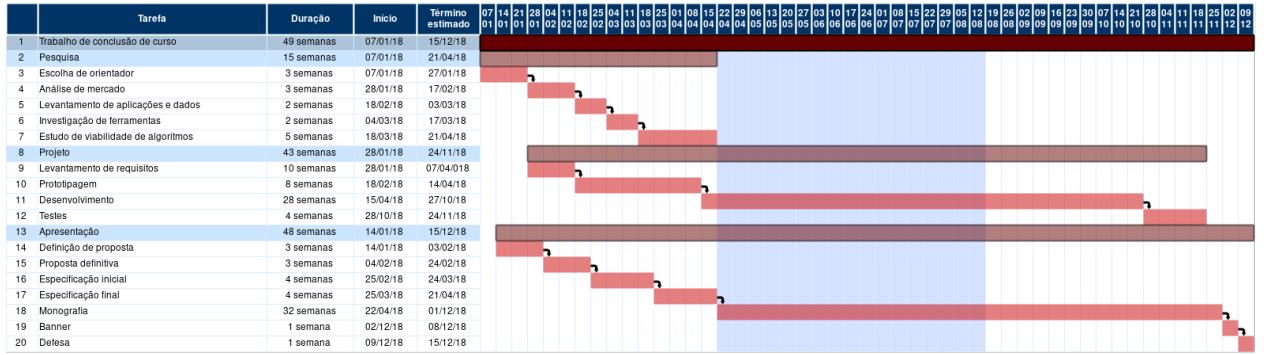


Figura 2: Diagrama de Gantt.

Desta forma, nos organizamos para realizar a implementação do sistema, separando as tarefas a serem realizadas nas categorias “pesquisa”, “projeto”, e “apresentação”. Utilizamos o cronograma oficial da disciplina de TCC para elaborar um diagrama de Gantt na Figura 2 com a sequência de tarefas a serem divididas pelo grupo ao longo do ano para cada semana. Indicamos também o período de módulo de estágio em fundo azul, quando haverá desenvolvimento do sistema de forma mais lenta e sem cronograma específico.

## 5 ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS DO SISTEMA

Tomando-se como base as tecnologias anteriormente citadas, definimos com mais detalhe as necessidades do sistema para priorizar o trabalho descrito no capítulo de “**Metodologia do Trabalho**”.

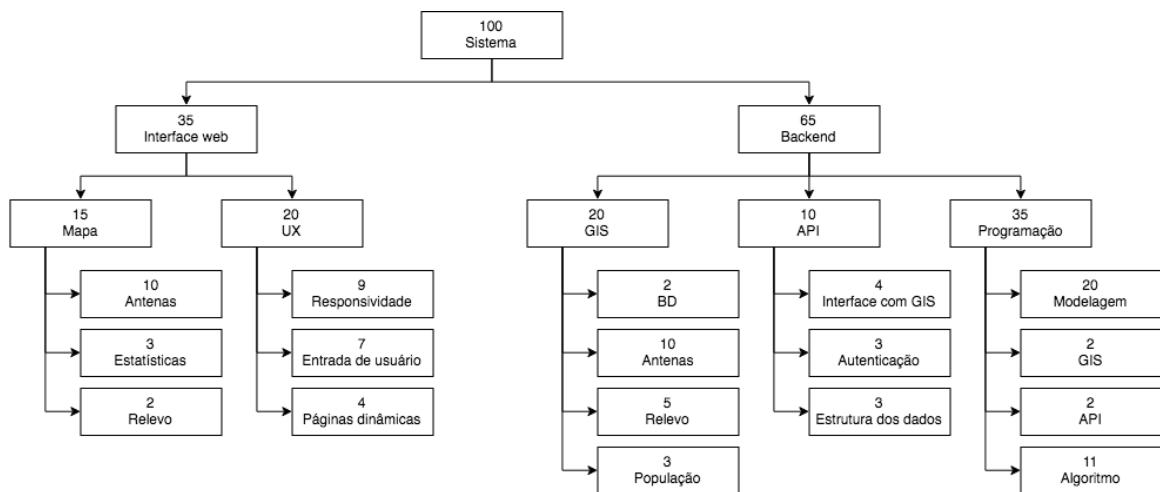


Figura 3: Árvore de pré-requisitos do sistema.

Para definir os requisitos do nosso sistema, foi elaborada uma árvore de pré-requisitos, listando a prioridade total dada a cada componente do sistema final na Figura 3. A divisão do trabalho foi feita baseada nos componentes de *front-end* e *back-end*, como discorrido anteriormente.

Como evidenciado pela árvore de pré-requisitos, a ênfase deste projeto foi no *back-end*; em especial, na parte de modelagem e programação relacionadas ao cálculo de otimização da posição de antenas. As outras duas partes relevantes do *back-end* tratam, respectivamente, da instalação e uso do banco de dados do SIG, e da comunicação externa de dados via API.

Embora tenha uma ênfase menor, o *front-end* da interface web também foi um requisito fundamental de projeto, separado na experiência do usuário e na visualização do

mapa.

Definido o escopo, começamos a pensar, junto com nosso orientador, sobre os requisitos do projeto. A estratégia utilizada foi o *brainstorming*, leitura de obras de referência na literatura (sobre otimização de posicionamento de antenas), e pesquisa de *softwares* com escopo parecido. A ideia inicial era ter como ator principal do sistema o funcionário cadastrado de uma empresa de instalação de antenas, porém posteriormente consideramos que seria complementar ao projeto considerar um usuário não-comercial, assim como um usuário administrador. Nessa fase, perguntamo-nos como o nosso projeto poderia ajudar esses atores, e quais informações ele poderia produzir. Esse processo nos levou à modelagem de diversos casos de uso de interesse do sistema. Alguns foram deixados de lado por fugirem do escopo do MVP, e estão listados na seção “**Perspectivas de Continuidade**” do último capítulo.

## 5.1 Casos de Uso

Nesta seção, apresentamos os caso de usos que nortearam o desenvolvimento e as decisões tomadas.

### 5.1.1 Atores

- Administrador
- Funcionário cadastrado de Empresa de instalação de antenas
- Usuário não-comercial

### 5.1.2 Requisitos Funcionais

- Efetuar *login*
- Efetuar *logout*
- Cadastrar usuário no sistema
- Exibir mapa com ERBs
- Exibir mapa com cobertura celular estimada
- Exibir localização ideal para instalação de uma nova ERB

- Adicionar nova ERB
- Fazer *login* por OAuth2
- Acessar API
- Exibir ERBs às quais o celular do usuário está conectado
- Exibir mapa com qualidade do sinal por operadora
- Estimar geolocalização do usuário
- Listar usuários

### 5.1.3 Requisitos Não-funcionais

- **Funcionalidades e código bem documentados:** O código deve estar desacoplado e coeso, de fácil legibilidade, e permitir refatorações.
- **Interface acessível e simples:** Os usuários devem ser capazes de utilizar o sistema com o mínimo de conhecimentos prévios, sem qualquer treinamento específico para o seu uso.
- **Ser responsivo:** O site deve ter as mesmas funcionalidades e mesma usabilidade em plataformas móveis e em *desktop*.
- **Ser dinâmico:** Os elementos devem carregar sem transições de página.
- **Ser rápido:** Os dados requisitados devem aparecer na tela com baixa latência, e os algoritmos devem responder aos pedidos de clientes com o mínimo de espera.
- **Ser seguro:** Deve haver um sistema de permissionamento para garantir uma hierarquia de usuários no uso de dados, não permitindo qualquer tipo de acesso indevido aos dados.

### 5.1.4 Descrição dos Casos de Uso

**Caso de Uso 1:** Efetuar *login* no sistema.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de autenticação no sistema.

**Evento iniciador:** Usuário informa seu nome de usuário e senha.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário na página de login.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário informa seu nome de usuário e sua senha.
2. Sistema autentica o usuário e senha.
3. Sistema exibe página inicial com opções correspondentes ao nível de privilégio do usuário.

**Pós-condições:** Usuário logado no sistema.

**Extensões:**

1. Usuário ou senha estão incorretos: Sistema exibe mensagem de erro (passo 2).
2. Login por OAuth2: Sistema recebe token de autenticação externa para o acesso (passo 1).

**Inclusões:** --

**Caso de Uso 2:** Efetuar *logout* no sistema.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de *logout* no sistema.

**Evento iniciador:** Usuário clica no botão de *logout*.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica no botão de *logout*.
2. Sistema exibe página inicial para usuários não-logados.

**Pós-condições:** Usuário deslogado do sistema.

**Extensões:** --

**Inclusões:** --

**Caso de Uso 3:** Exibir mapa

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de exibição de um mapa centrado na localização do usuário.

**Evento iniciador:** Usuário requisita exibição de mapa.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário requisita exibição de mapa.
2. Sistema pede que o usuário permita acessar sua geolocalização.
3. Usuário permite que o sistema acesse sua geolocalização.
4. Sistema mostra um mapa centrado no usuário.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs apresentado.

**Extensões:** Usuário não permite: Sistema mostra mapa centrado em uma localização padrão. (passo 4)

**Inclusões:** Busca de mapa no OpenStreetMap (passo 4)

**Caso de Uso 4:** Exibir mapa com ERBs.

**Descrição:** Este caso de uso descreve a exibição das ERBs em um mapa.

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Mapa de ERBs”.

**Atores:** Administrador, Funcionário.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Mapa de ERBs”.
2. Sistema exibe mapa com ERBs da região.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs apresentado.

**Extensões:** --

**Inclusões:** Caso de uso 3 “Exibir mapa” (passo 2)

**Caso de Uso 5:** Exibir mapa centrado em localização dada

**Descrição:** Este caso de uso descreve a exibição do mapa com ERBs centrado em uma localização dada pelo usuário.

**Evento iniciador:** Usuário insere a latitude e longitude e clica em “Buscar”.

**Atores:** Administrador, Funcionário.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema e na página com mapa de ERBs.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário insere a latitude e longitude e clica em “Buscar”.
2. Sistema mostra o mapa de ERBs centrado na localização dada.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs centrado na localização dada apresentado.

**Extensões:** Latitude ou longitude inválida: Sistema mostra uma mensagem de erro (passo 2)

**Inclusões:**

1. Busca de mapa no OpenStreetMap (passo 2)
2. Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (pré-condição)

**Caso de Uso 6:** Exibir ERBs no mapa por operadora.

**Descrição:** Este caso de uso descreve a exibição do mapa com ERBs para uma operadora definida pelo usuário.

**Evento iniciador:** Usuário seleciona uma operadora.

**Atores:** Administrador, Funcionário.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema e na página com mapa de ERBs.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário seleciona uma operadora.
2. Sistema mostra o mapa de ERBs da operadora dada pelo usuário.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs da operadora escolhida.

**Extensões:** --

**Inclusões:** Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (pré-condição)

**Caso de Uso 7:** Encontrar local de instalação de ERBs.

**Descrição:** Este caso de uso descreve a exibição de posições otimizadas para instalação de ERBs.

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Calcular posição para instalação”.

**Atores:** Administrador, Funcionário.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema e na página “Mapa de ERBs”.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Calcular posição para instalação” .
2. Sistema exibe um formulário com campos: “Quantidade de ERBs a serem instaladas” e “Parâmetros a serem considerados no cálculo”.
3. Usuário preenche o formulário e clica em avançar.

4. Sistema solicita para o usuário selecionar a região de interesse.
5. Usuário seleciona a região de interesse.
6. Sistema informa que operação pode demorar.
7. Sistema indica os locais calculados no mapa e mostra número de usuários atendidos por cada nova antena.

**Pós-condições:** Mapa com posições otimizadas apresentadas.

**Extensões:** Operação demora muito tempo: Sistema informa que não foi possível calcular a posição (passo 7)

**Inclusões:** Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (pré-condição).



## 6 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

Definidos os requisitos e as tecnologias a serem utilizadas, e os conceitos abordados em cada algoritmo, iniciaram-se as implementações conforme o capítulo “**Metodologia do Trabalho**”. As partes relevantes do sistema e as soluções encontradas são mencionadas nos títulos das seções a seguir.

### 6.1 *Back-end*

A utilização do *back-end* no sistema foi, no geral, para a obtenção de dados existentes em bancos de dados e a computação de novas posições ótimas para as antenas. Apesar de não estar diretamente visível ao usuário, esta parte do sistema se mostrou também com dificuldades intrínsecas que nós precisamos enfrentar. Nas seções a seguir, detalharemos as medidas tomadas em cada etapa.

#### 6.1.1 Modelagem de ERBs

Anteriormente, comentamos sobre a criação de dois modelos de ERBs, cada um referente a uma de duas bases de dados. Uma das base utiliza dados oficiais da Anatel para indicar as antenas oficialmente registradas que, portanto, pertencem a uma única operadora oficialmente [11]. Estas antenas foram denominadas “Antenas Apropriadas” (“*Owned Base Stations*”), pois indicam as operadoras às quais pertencem.

A outra base apresenta antenas distinguíveis por um identificador global, portanto acaba exibindo uma única antena compartilhada como várias entradas do banco de dados, equivalente ao número de operadoras do compartilhamento [12]. Como possuem um identificador de padrão global, estes dados foram chamados de “Antenas Identificadas” (“*Identified Base Stations*”) no código. Tanto os dados dessa base quanto da anterior são representados como arquivos *Comma-Separated Values* (CSV) em suas origens.

Para cada modelo, criamos um *script* que parseia os dados de entrada e popula as

entradas no banco de dados. Estes *scripts* utilizaram o suporte nativo do Django ao desenvolvimento para linha de comando, para facilitar o uso.

Os dados da Anatel foram extraídos e desestruturados em latitude e longitude, operadora, Unidade Federativa (UF), município e endereço. Também foram criados modelos adicionais para agregar antenas por operadora e por UF.

Para a base de dados aberta, foram utilizados como parâmetros a latitude e a longitude, os campos do CGI que identifica cada antena, o tipo de rádio, e o sinal médio detectado. Como esta base possui dados globais de antenas, filtramos apenas para os do Brasil; para isso, utilizamos um dos campos do CGI, o *Mobile Country Code* (MCC) – que é único por país – como filtro das linhas do arquivo CSV. O MCC do Brasil é 724 [14].

Com estes dois scripts, conseguimos importar todos os dados relevantes destes arquivos para o PostGIS. Porém, em etapas posteriores do projeto, foi necessário escolher um modelo principal para implementar a solução. Para chegar a um consenso, conversamos dentro do grupo, com o orientador, e com Milton Kaoru Kashiwakura, Diretor de Projetos Especiais e Desenvolvimento do NIC.br.

Devido à proeminência do compartilhamento de antenas entre empresas de telecomunicação, optamos por utilizar a segunda base nas etapas subsequentes do projeto, como representação mais realista da cobertura celular no Brasil. Como não há uma correlação direta das antenas com cada operadora, ao contrário da outra base, utilizou-se um campo específico do CGI, denominado *Mobile Network Code* (MNC) – que especifica uma única operadora dentro de um país –, para verificar a qual empresa pertence cada antena nas etapas subsequentes do trabalho. Assim, foi criado um modelo no banco de dados específico para guardar os valores de MNC e respectivas operadoras, pois esta informação é útil para filtrar estes dados. As instâncias desse modelo foram populadas a partir da base de dados de referência [14].

Podemos representar estes modelos (antenas, UFs, operadoras e MNC) por um diagrama de classes, apresentado na Figura 4. Alguns detalhes importantes:

- Foi criada uma classe abstrata para representar as antenas, que possui apenas o campo de localização e um método para obter a área de cobertura daquela antena.
- Alguns campos, como número atribuído às operadoras pela Anatel, ou país da UF, não serão utilizados, mas ainda foram preenchidos a partir das bases de origem, pois podem ser úteis num produto futuro.
- O campo MNC das “Antenas Identificadas” será redundante quanto à relação, já

que o seu `mnc` e o `valor` do outro modelo serão iguais. Isso permite que o CGI dessas antenas seja obtido apenas por seus campos, sem requisitar uma outra tabela para MNC na *query* ao banco.

- Um outro modelo, “Cluster de Antena”, foi criado para otimizar as operações de mapa, como será descrito na próxima seção. As relações deste modelo com as antenas são feitas por métodos fora do banco de dados, de forma a evitar um consumo alto de dados de *clusters* no disco do PostGIS.

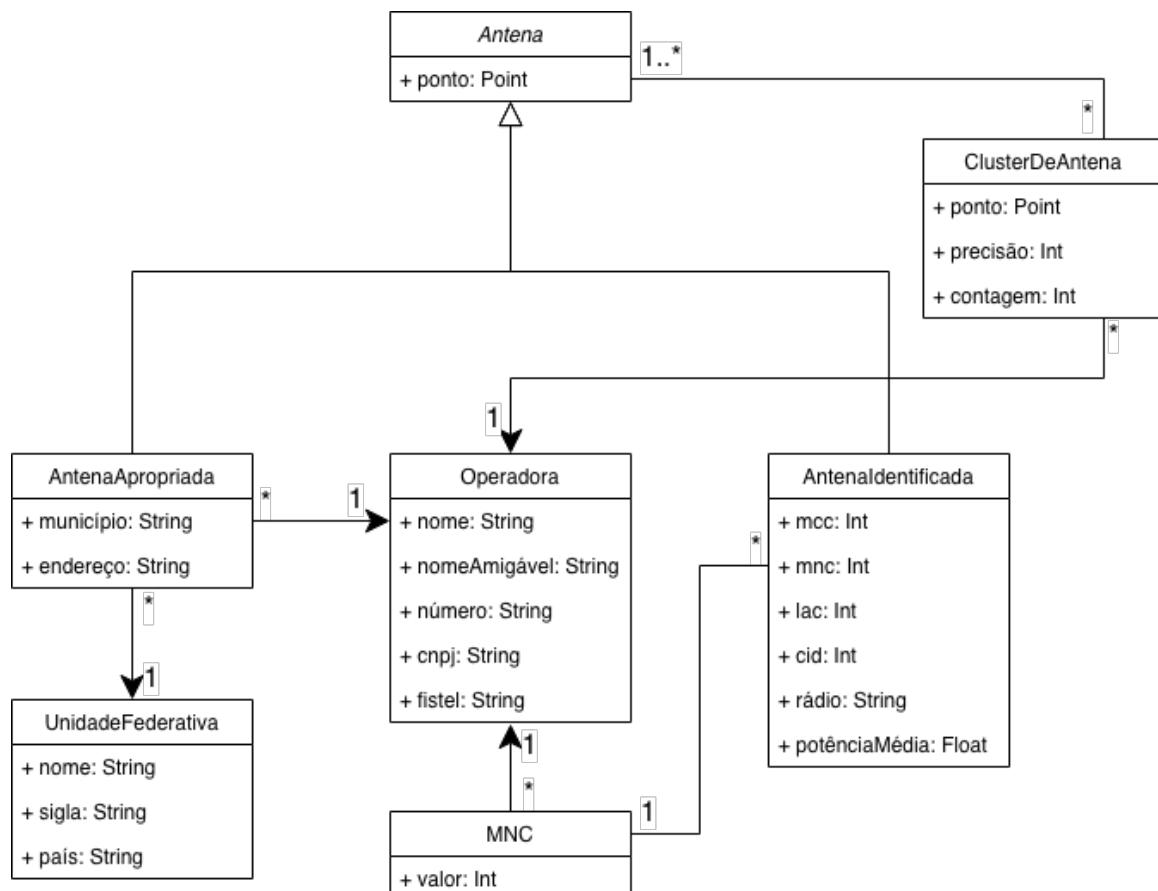


Figura 4: Diagrama de classes das antenas.

### 6.1.2 Clusterização

Um dos principais desafios na implementação foi realizar a exibição de múltiplas antenas como pontos em um mapa (Figura 5). Como muitas ERBs ficam próximas das outras e, portanto, difíceis de serem visualizadas separadamente, utilizou-se um *plugin* próprio da biblioteca do Leaflet para a clusterização de pontos (Figura 6), facilitando a identificação da quantidade de antenas em uma região, com exibição variável com o zoom.

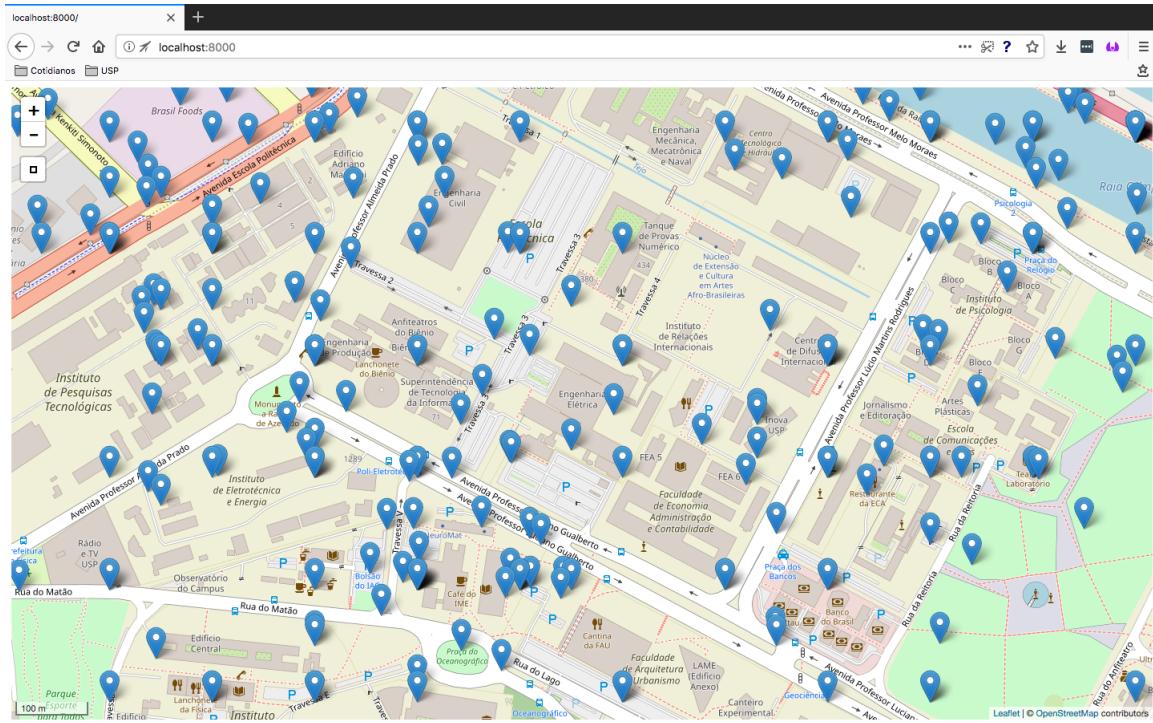


Figura 5: Mapa de ERBs sem clusterização.

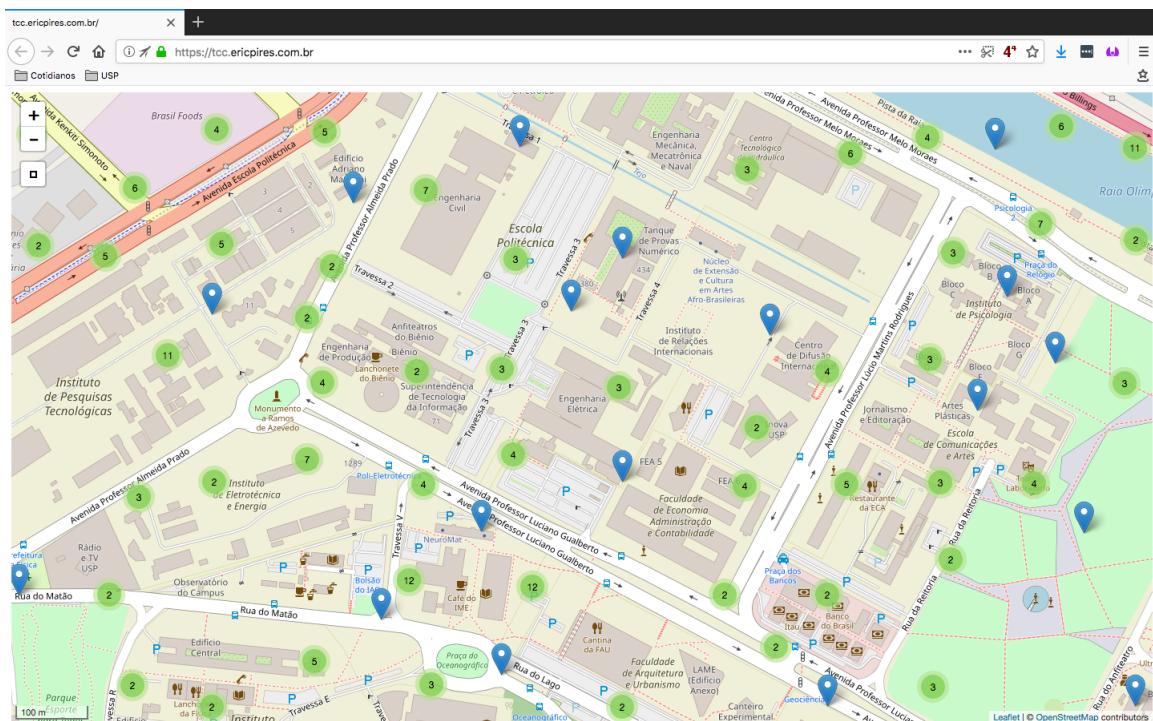


Figura 6: Mapa de ERBs com clusterização.

Com o uso desse plugin, a exibição de até cerca de 500 antenas na tela tornou-se possível. Porém, exceder este número causava vários problemas relacionados a uma grande

quantidade de dados, como demora na transmissão por HTTP, requisições intensivas ao servidor, e problemas de desempenho no navegador do cliente. Algumas medidas foram tomadas tanto no *back-end* quanto no *front-end* para tentar amenizar estes efeitos, como otimizar scripts de requisição de dados à API, mas não houve vantagens perceptíveis.

Dessa forma, resolveu-se utilizar algoritmos de clusterização no *back-end*, e então realizar a integração com o *front-end*. A primeira tentativa envolveu a utilização de uma biblioteca *open-source* específica para o GeoDjango, chamada “*Anycluster*” [15]. Embora tenha sido feita para uma configuração de servidor similar à utilizada no projeto, a instalação e documentação se mostraram confusas e incompletas. Mesmo com tentativas de ajuste manual no código, incluindo refatoração das partes não-essenciais da aplicação, não foi possível integrar este código à nossa base. Além disso, a análise do código indica que não há nenhuma forma de cache dos dados de clusterização, o que não resultaria em velocidades adequadas para uma aplicação de visualização em mapa com vários clientes.

Procurou-se então uma segunda alternativa de clusterização, com implementação própria para este projeto. A solução envolve utilizar o *tiling* de grade que o OpenStreetMap utiliza para carregar as imagens. A clusterização foi feita com fórmulas do PostGIS específicas para clusterização de pontos. Para o armazenamento temporário dos *clusters*, utilizou-se o cache padrão do Django. Os resultados gerados pelo programa eram corretos, mas o uso alto de memória e o tempo para clusterizar antes de realizar cache inviabilizam o uso no servidor. Foi realizado um aumento na capacidade da máquina do servidor, mas não houve ganhos consideráveis. Além disso, os dados de *cluster* ficam com aparência estranha, onde a separação em grade fica muito perceptível por ter um formato reticulado.

A terceira tentativa utilizou a mesma ideia anterior; porém, para um dado nível de zoom, seriam utilizados os *clusters* para um zoom mais próximo do mapa, portanto, usando 4 vezes mais dados. Ainda houve alguns *clusters* estranhos na visualização do mapa, embora consideravelmente melhores no geral; mas combinado com o uso de dados muito alto tanto em processamento quanto em rede, uma utilização com muitos clientes se tornaria inviável.

Em seguida, na quarta tentativa, optamos por salvar os *clusters* em banco de dados, onde são indexados por zoom como nas tentativas anteriores. Para acelerar o algoritmo de cálculo de *clusters*, utiliza-se os *clusters* de um zoom menor para gerar os de zooms maiores. Foram feitas algumas iterações com diferentes funções de clusterização do PostGIS para obter resultados melhores. A utilização de modelos ao invés de cache resultou em uma fácil integração com o *front-end* já existente, dada a facilidade do Django para

lidar com modelos na API. Porém, os resultados obtidos foram inesperados, com clusters baseados na distância ponto-a-ponto ao invés de ao redor de um centro de massa. Dessa forma, lugares com muitas antenas lado-a-lado, em uma área com alta densidade de pontos, como a cidade de São Paulo, aparecem como um único *cluster*, independentemente do zoom, e às vezes muito longe do centro, deixando muitas áreas vazias.

A quinta tentativa se baseou nas demais, e também no conceito de *Geohash* (anotação de cada região em um mapa com caracteres alfanuméricos, dividindo cada região sucessiva do globo em 16 partes). Foi selecionada uma precisão (i.e. um número de caracteres do *geohash*) diferente para cada zoom, seguindo-se como referência a biblioteca “*django-geohash-cluster*” [16], onde a precisão máxima é de 7 caracteres, o equivalente a uma precisão de aproximadamente 76 metros no Equador, o que é suficiente para os níveis de zoom utilizados. Além disso, o código do *front-end* foi modificado especificamente para fins de desempenho, obtendo assim clusterizações com visualização mais natural. Graças ao suporte do GeoDjango para inserir o *geohash* em *queries*, foi possível realizar a implementação em um algoritmo simples, sem escrever as *queries* manualmente. A principal desvantagem deste algoritmo foi a demora para realizar as clusterizações em comparação com os demais algoritmos; porém, o resultado final com a integração de clusterização *front-end* e *back-end* foi melhor em desempenho. Outra desvantagem foi que, como não há correspondência direta entre níveis de zoom do mapa e precisões de *geohash*, determinados níveis de zoom demoram mais tempo para ler os dados. Além disso, há algumas pequenas falhas visuais perto das bordas, que foram corrigidas posteriormente. Por fim, foram realizadas alterações na API para tornar a transição entre *clusters* e ERBs na exibição do mapa opaca para o usuário final, ou seja, o *script* de exibição do mapa do navegador enxerga um único *endpoint* e não diferencia quando o servidor opta por enviar dados de antenas ao invés de *clusters* para níveis de zoom mais precisos.

Este algoritmo foi expandido para também permitir a filtragem por operadora de celular. Esta filtragem se baseia no campo MNC do identificador de cada estação radiobase, que distingue a empresa responsável. Para filtros mais precisos, como tipo de tecnologia celular, não foi utilizada clusterização, com carregamento e exibição diretamente no mapa, já que esta visualização abrange um número menor de antenas a serem exibidas e varia com o caso de uso de cada usuário, portanto sendo um processo menos repetitivo para o servidor, que não se beneficia de mecanismo de cache.

Vale notar que, para a implementação de filtragem por operadora, os *clusters* de todas as antenas utilizam um campo nulo para representar a operadora. Isso é importante porque, ao exibir os *clusters* sem filtro específico de operadora, na realidade, deverá ser

feito filtro por operadora igual ao valor nulo. Esta distinção terá maior importância quando o cliente requisitar dados de clusters pela API, como descrito mais adiante.

Por fim, foi implementada a lógica adicional ao adicionar novas antenas no banco de dados, para atualizar automaticamente os respectivos *clusters*.

### 6.1.3 Métodos Numéricos

Em um primeiro momento, utilizamos três métodos para comparação entre algoritmos: Taguchi, Basinhopping e SLSQP. A função de otimização foi desacoplada da implementação do método numérico. Desse modo, podemos combinar quaisquer métodos numéricos implementados com quaisquer funções de otimização.

Para os métodos Basinhopping e SLSQP, usamos a implementação disponível na biblioteca “`scipy`” [17].

Já o método Taguchi foi implementado de acordo com a especificação especificada no capítulo “**Aspectos Conceituais**”. Os *arrays* ortogonais usados pelo método foram implementados como uma tabela, uma vez que seu cálculo é uma operação complexa, e os casos de uso preveem o uso de poucos parâmetros no método Taguchi. Usamos a biblioteca “`numpy`” [18] para as operações com *array*, uma vez que ela provê operações eficientes nessas estruturas de dados.

Por fim, escolhemos o Método Taguchi, pois ele se comportou melhor que os demais nos testes, encontrando um número maior mínimos globais (desejados na nossa otimização) que o SLSQP e o Basinhopping. Além disso, tivemos um entendimento melhor de seu funcionamento uma vez que nós o implementamos. Os detalhes sobre os testes mencionados encontram-se no capítulo “Testes e Avaliação”.

### 6.1.4 Interface de Programação de Aplicações

A integração do *back-end* com o *front-end* foi feita por uma API HTTP, que abstrai as funcionalidades e os dados necessários para a realização dos casos de uso. Resumidamente, essa API deverá ser responsável por três tarefas específicas:

- Realizar *login* de usuários no sistema.
- Exibir dados de mapas na tela.
- Gerar otimização de posição de antena.

Desta forma, foram expostos *endpoints* para cada uma das tarefas. A utilização da biblioteca Django REST Framework facilitou o processo de integração da API ao *back-end* desenvolvido. O cliente de *front-end* – no caso, o Vue – poderá descobrir estes *endpoints* a partir de um outro *endpoint* específico que expõe estas informações, de forma a tornar refatorações do *back-end* dinâmicas.

Algumas alterações tiveram que ser feitas tanto na configuração do Django quanto na criação de *endpoints* de API para a realização esperada dos casos de uso. A primeira se refere ao *login* de usuários, pois necessitou de reconfiguração da autenticação do Django. Esta autenticação foi modificada para permitir que, por um *endpoint* específico de *login*, um usuário realize uma requisição POST com seu nome de usuário e senha e receba um *token*, que pode ser utilizado nas requisições autenticadas subsequentes. Como a autenticação padrão do Django não utiliza *tokens*, mas sim parâmetros de sessão específicos, alteramos esta configuração.

Outra modificação se refere à exibição de dados no mapa. Devido ao esquema de clusterização por *geohash* descrito anteriormente, optou-se por uma abordagem opaca na API, aonde o usuário deverá indicar apenas as coordenadas da tela, o tamanho de zoom atual, e o filtro de operadora. Dessa forma, foi descrita lógica adicional neste *endpoint* para converter o tamanho de zoom à precisão de geohash correspondente. Além disso, o filtro de operadora foi complementado com o caso geral de não filtrar por operadora, pois a modelagem dos *clusters* no banco de dados requer um filtro específico – i.e. campo de operadora é nulo – para *clusters* sem filtro de operadora.

### 6.1.5 Bancos de Dados Externos

Alguns dados adicionais mencionados anteriormente, que não serão persistidos no banco de dados, são referentes a população e relevo. Ao longo de nossa pesquisa, nos foi indicado o uso do Google Earth Engine [13], que é um motor de dados geoespaciais disponível publicamente para ferramentas de análise científica e pesquisa. Dentro desta plataforma, dois *datasets* estudados para uso no sistema são “USGS/SRTMGL1\_003” para topografia, e “WorldPop/POP” para densidade populacional.

O Google Earth Engine possui uma API oficial em Python, que foi estudada e implementada no *back-end*. A implementação criada permite persistir dados no cache do servidor, para evitar que valores frequentemente utilizados nos algoritmos de otimização (i.e. uma única área analisada repetidamente) sejam baixadas novamente a cada execução. O uso desses dados segue os passos descritos para dados *raster* do capítulo “Aspectos

Conceituais”.

### 6.1.6 Instalação de Servidor

O *back-end* do sistema foi instalado em um servidor remoto para apresentações e testes. Utilizou-se o serviço DigitalOcean para a virtualização de servidor, onde subiu-se a instância por SSH em uma distribuição Ubuntu. As chaves SSH foram distribuídas aos integrantes do grupo e ao orientador para permitir o acesso a todos. Nesta máquina, instalamos o repositório em Python, o banco de dados PostgreSQL, e as aplicações adicionais necessárias para o GeoDjango/PostGIS. Os passos tomados na configuração foram:

- Criar e ativar um ambiente virtual do Python (`virtualenv`).
- Instalar dependências em Python do projeto.
- Obter a extensão do PostGIS para o PostgreSQL, e as bibliotecas GEOS, PROJ.4, GDAL, GeoIP2.
- Criar um *schema* no banco de dados para a aplicação e aplicar migrações de modelos.
- Carregar dados de antenas apropriadas e identificadas.
- Gerar diretório de arquivos estáticos do Django.
- Obter arquivos de localização por IP para a biblioteca GeoIP2.
- Registrar-se no Google Earth Engine, gerar *token* de autenticação, e salvar no ambiente de usuário da máquina.
- Criar usuários administradores para os membros do grupo e para demonstração.
- Habilitar cache em disco por banco de dados.

Estes passos foram reproduzidos em um `README` do repositório, para facilitar a criação de novos ambientes de desenvolvimento.

Ainda neste servidor virtual, foram instalados o Nginx e o Gunicorn, para o *proxy* e o acesso HTTP, respectivamente. Também foi utilizado um nome de domínio para o servidor, que foi configurado no Nginx. Além disso, por questão de segurança, também configurou-se o acesso HTTPS ao servidor, através do Let’s Encrypt e sua configuração para *proxy*.

Por fim, para facilitar o *deployment* da aplicação para testes, configurou-se o repositório local do Git como um repositório remoto, permitindo que seja atualizado por SSH com um único comando; e as regras de *pull* do repositório foram modificadas para aplicar novas alterações no código instantaneamente – como migração de banco de dados, coleta de arquivos estáticos, novos *endpoints*, dentre outros.

Uma medida tomada por segurança e por limitações técnicas na instalação do *back-end* foi a utilização de ambientes de desenvolvimento – isto é, a definição manual de variáveis do Django, sensíveis e/ou específicas por máquina. Para isto, foi criado um novo arquivo, `config_settings.py`, que é importado pelo arquivo de configurações padrão do Django (`settings.py`) e é ignorado pela ferramenta Git. Dentre as variáveis deste arquivo, estão:

- Uma *flag* de debug, utilizada pelo Django para exibir informações sensíveis de erro quando habilitada.
- Uma chave secreta, utilizada para gerar *hashes* de segurança.
- Lista de *hostnames* aceitos para conexões de entrada, que foi definida para os IPs da máquina e o nome de domínio.
- A conexão ao banco de dados, com usuário, senha e *schema*.
- Dados de acesso a autenticação social em serviços como GitHub e Facebook.

Alguns dados e parâmetros acima foram colocados como opcionais, para facilitar a instalação de ambientes de desenvolvimento. Por exemplo, a biblioteca GeoIP2, que tenta estimar a localização do usuário pelo IP, foi colocada no código como dependência opcional, devido ao tamanho dos arquivos consumidos e à falta de necessidade de seu uso para testes. Os dados de acesso para serviços sociais também foram tornados opcionais pela mesma razão.

## 6.2 *Front-end*

Para elaborar o *front-end*, usamos o *framework* Vue.js. O front-end da nossa aplicação foi responsável pela parte visual, pela comunicação do cliente com a API do Django, pela exibição dos dados no mapa, e pelo recebimento das entradas do usuário. Nas seções a seguir, detalharemos como planejamos e implementamos cada uma dessas partes.

### 6.2.1 Projeto de Telas

O planejamento do *front-end* começou com o desenho das telas. Pensamos em telas que implementassem os casos de uso, além de serem fáceis de usar tanto em *desktop* como em *smartphones*.

A primeira tela projetada foi a tela de mapas. Inicialmente, ela teria o mapa com os clusters e um menu lateral com opções de filtro por operadora e tecnologia, opções de remoção, adição e exportação de ERBs e um botão para executar o algoritmo de cálculo da posição ideal a partir de parâmetros fornecidos pelo usuário (Figura 7). Criamos os desenhos com papel e lápis, visto que tratam-se de uma representação de baixa fidelidade. Depois de algumas iterações, removemos algumas funcionalidades e adicionamos outros filtros.

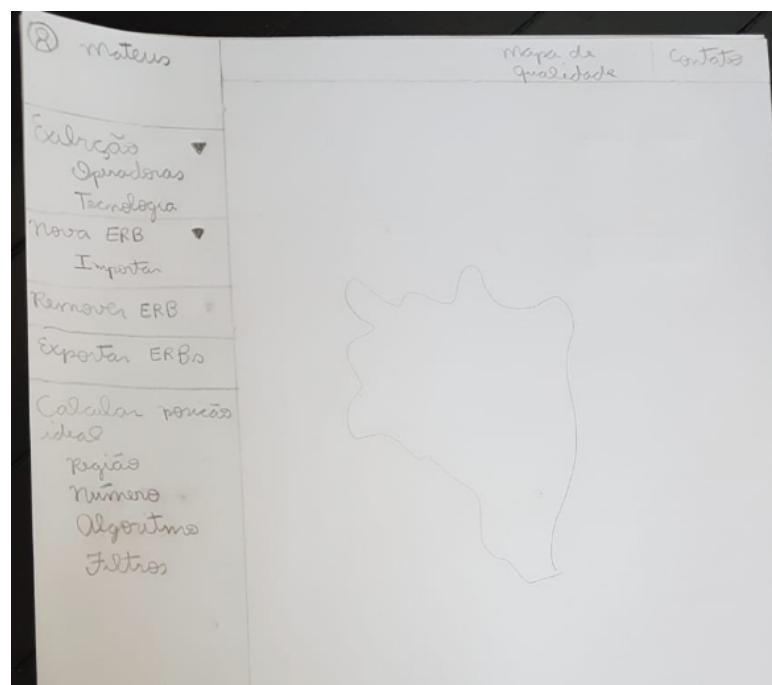


Figura 7: Projeto inicial da tela de mapas.

Outra tela projetada foi a tela inicial, com imagens do sistema funcionando, textos explicativos e um formulário de contato (figura 8). O objetivo dessa tela é fornecer uma ideia inicial das funcionalidades do nosso projeto.

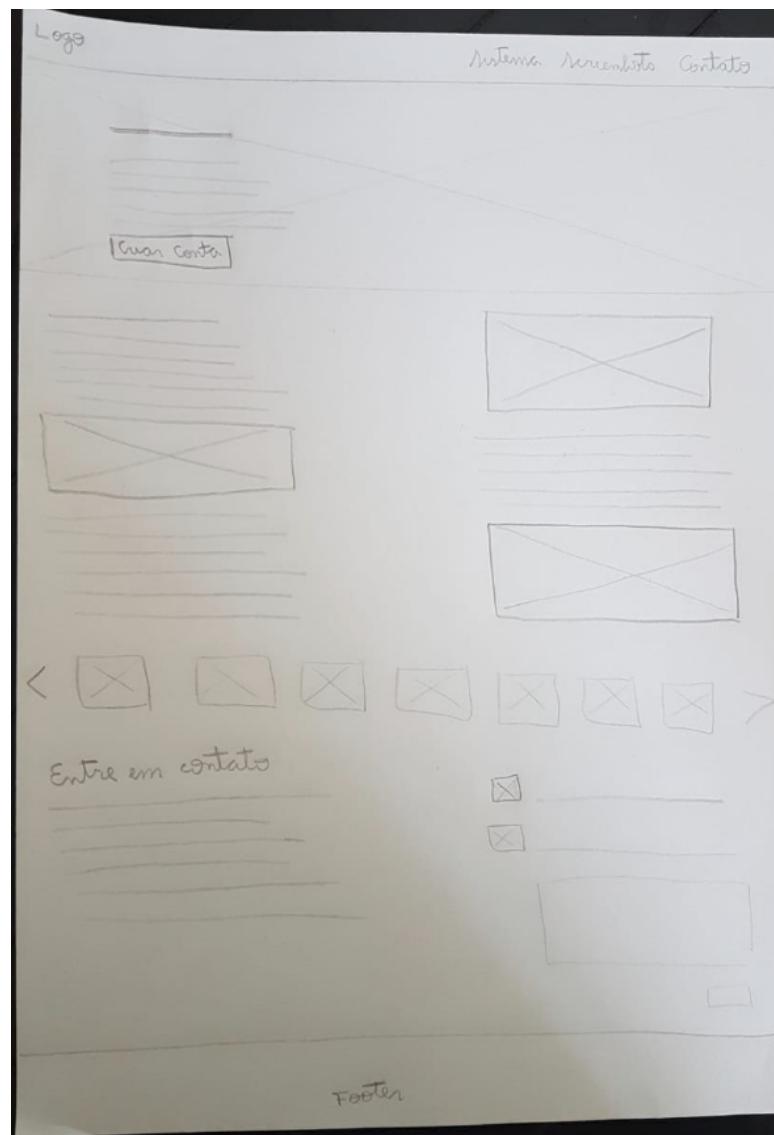


Figura 8: Projeto inicial da tela inicial.

Pensamos também na tela de *login*, na qual o usuário entra com seu nome de usuário e senha (Figura 9). Essa seria a tela à qual ele seria redirecionado caso não estivesse logado.

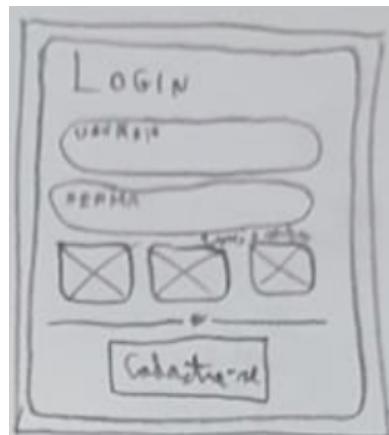


Figura 9: Projeto inicial da tela de login.

### 6.2.2 Leaflet

O Leaflet é uma biblioteca de código aberto para a criação de mapas interativos em JavaScript, com suporte nativo a celulares, extensa API e suporte a várias funcionalidades, como exibição de pontos, linhas e polígonos, utilização de camadas, suporte a *raster*, sobreposição de dados, suporte ao formato de entrada GeoJSON comumente utilizado em SIGs, dentre outras. Além disso, ela possui uma extensa galeria de *plugins* de terceiros para estender a funcionalidade do mapa, como:

- **Leaflet.MarkerCluster**, que permite aglomerar pontos próximos com facilidade.
- **Leaflet.draw**, para desenhar e editar figuras no mapa, como retângulos e círculos.

Estes dois *plugins* foram utilizados no *front-end* em conjunto com o Leaflet para a exibição de antenas e para a seleção de área de otimização, respectivamente. No caso do Leaflet.MarkerCluster, especificamente, foram feitos ajustes no código para tratar a API, que expõe as informações de *cluster* pré-renderizadas em um formato específico, como apresentado na seção desta monografia sobre clusterização do *back-end*.

### 6.2.3 Implementação com Vue.js e Vuetify

Usamos o *framework* Vue.js no front-end do nosso projeto. Ele é um dos *frameworks* JavaScript mais populares da atualidade. Seu uso aumenta muito a produtividade e organização do código, porque ele divide o sistema em componentes pequenos e reutilizáveis. Outro benefício é o *single-page application* que o Vue.js disponibiliza. Com ele, a página não é recarregada quando o usuário muda de tela, mas apenas os componentes diferentes

entre telas que são trocados. Dessa forma, os componentes comuns a várias telas (como *header* e *footer*) nunca são recarregados. Isso propicia uma experiência mais fluida para o usuário.

Para tratar do visual do sistema, usamos a biblioteca Vuetify. Ela provê componentes com visual característico do Material Design para o Vue.js. O Material Design é uma linguagem visual criada pela Google que oferece um visual intuitivo que se aproxima do *design* do mundo real com tinta e papel, trabalhando com camadas e sombras que dão uma sensação tátil para o usuário. O uso do Vuetify facilitou muito o desenvolvimento, pois não precisamos nos preocupar muito com o estilo de cada elemento HTML.

Com relação às telas criadas, a tela de mapa usa um menu lateral, com opções de filtro, um botão para executar o algoritmo de otimização, e um botão para exibir mapa de calor. As opções de menu são seleções retangulares, por círculo, tecnologia e cidades. Os filtros não implementados foram desabilitados. Com isso, a tela final (Figura 10) ficou um pouco diferente da planejada na etapa de projeto de telas.

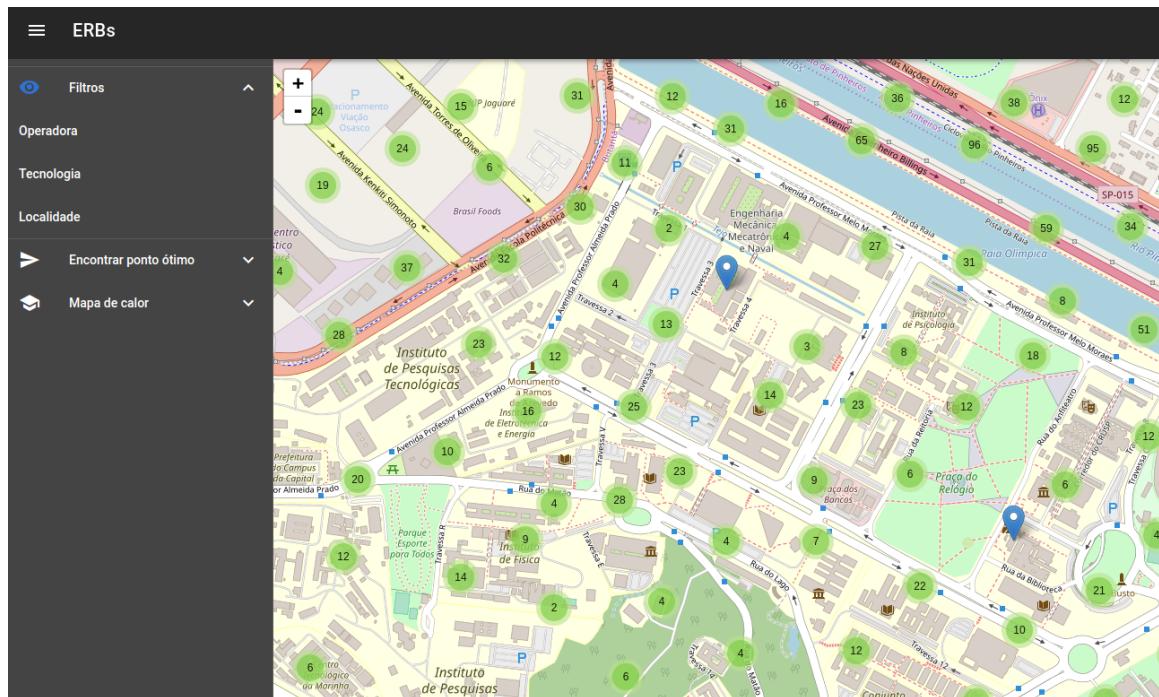


Figura 10: Tela de mapa.

Ao escolher a opção de menu de seleção, podemos selecionar um retângulo ou circunferência no mapa (Figura 11).

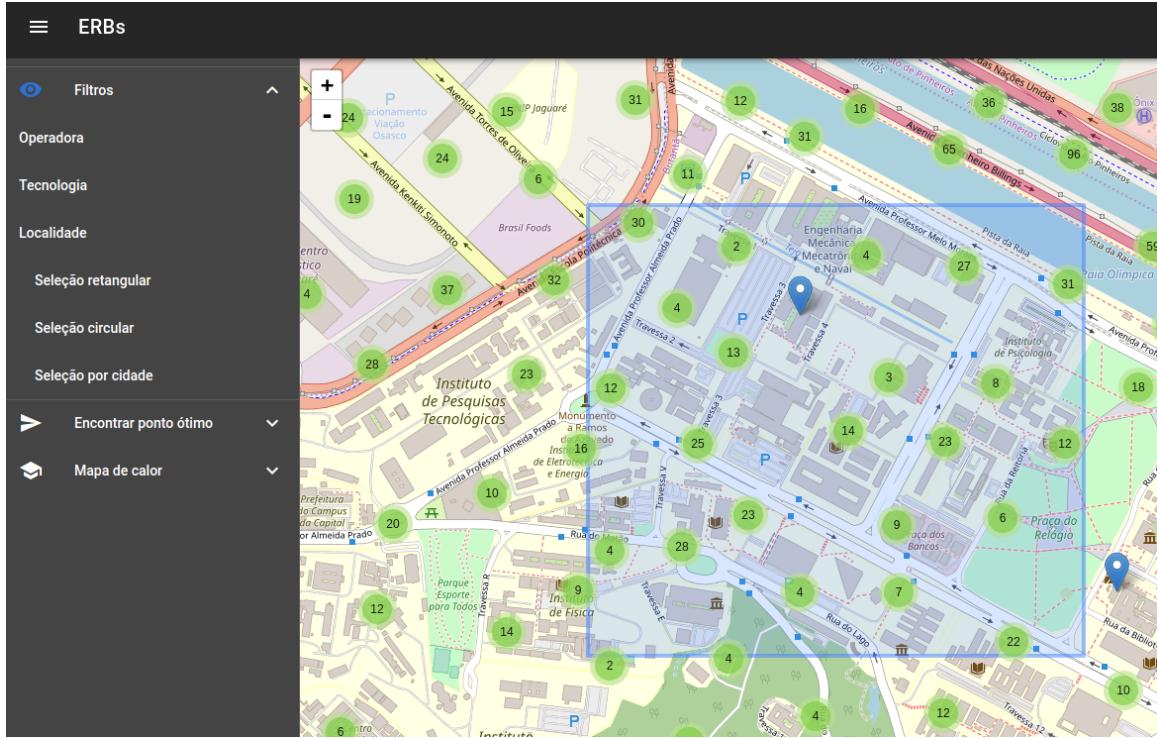


Figura 11: Tela de mapa com seleção de área retangular.

A tela de *login* (Figura 12) é um formulário simples com um campo de usuário e senha.

The figure shows a screenshot of a login form. The title of the form is 'Login'. It contains two input fields: 'Email' with the value 'mateus' and 'Senha' with a password placeholder. Below the inputs is a large 'LOGIN' button. The entire form is contained within a light gray box.

Figura 12: Tela de *login*.

Por fim, para a *landing page*, foi utilizado um *template* aberto do site Cruip [19]. Ele permitiu elaborar uma página chamativa com as principais informações do projeto (Figura 13), sem despender muito tempo de desenvolvimento para a criação da página.

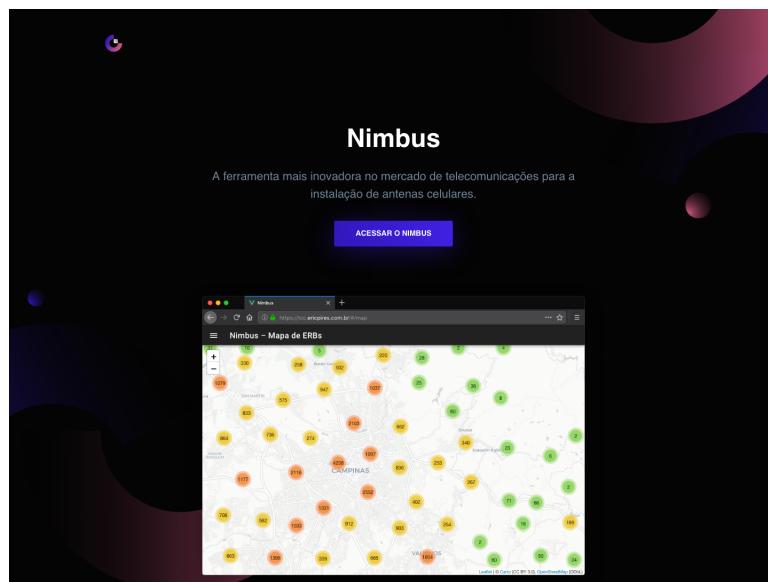


Figura 13: Tela de *landing page*.

#### 6.2.4 Integração com *Back-end*

O *front-end* foi responsável por fazer as chamadas da API. Usamos o `axios.js`, uma biblioteca JavaScript bastante popular, usada para fazer requisições HTTP. Com ele, os retornos da API são convertidos automaticamente em JSON, formato adequado para manipulação dentro do JavaScript.

Para a autenticação, na página de *login*, enviamos o usuário e a senha digitados pelo usuário para o *endpoint* de *login*. Caso válidos, o *back-end* retorna um *token* necessário para realizar outras consultas. Usamos o gerenciador de estado Vuex para armazenar esse *token* no escopo global. O Vuex permite que todos os componentes da aplicação compartilhem o mesmo estado e que a mudança de estado seja previsível e refletida para todos os componentes.

Com esse *token* em mãos, podemos fazer as chamadas de API restritas aos usuários autenticados, e assim implementar nossos casos de uso. Isso foi feito adicionando-o ao cabeçalho `Authorization` do HTTP. Caso o usuário tentasse acessar a página de mapas e o *token* não estivesse salvo no Vuex, o usuário seria redirecionado à página de *login*.

Para obter dados de antenas para exibir no mapa, e realizar requisições de cálculo de instalação de novas antenas, foram usados os *endpoints* específicos criados no *back-end*.

### 6.2.5 Instalação de *Front-end*

Graças à interface de linha de comando do Vue, é possível gerar arquivos prontos para produção com um simples comando de `build`. Estes arquivos incluem uma página HTML, um *favicon* e os arquivos de JavaScript e CSS. Dessa forma, é possível servir a aplicação em um servidor estático, apenas direcionando aos arquivos na pasta `dist` gerada.

Para realizar o *deployment* do *front-end*, optamos pelo serviço Netlify [20], que é uma plataforma de integração contínua (do inglês, *continuous integration*) para websites, com um *pipeline* de entrega da última versão de um código fonte. Ela automaticamente gera o site para cada alteração do código e disponibiliza em uma URL própria. Como o código desenvolvido é todo aberto, podemos utilizar esta ferramenta gratuitamente pelos termos de uso do produto, disponibilizando o site em um domínio que pertence ao grupo sem necessitar da instalação de um novo servidor. Esta ferramenta também possui suporte a HTTPS por padrão, e permite configurar as entradas do DNS facilmente.

Foram necessárias algumas modificações no código de geração de arquivos estáticos do Vue, relacionadas à pré-renderização dos componentes de desenvolvimento *client-side* para uso como HTML no pós-processamento do Netlify. Feitas estas alterações, testamos novamente o serviço, que funcionou conforme o esperado.

## 7 TESTES E AVALIAÇÃO

Após a implementação de funcionalidades-chave do projeto, como os algoritmos de otimização e o desenvolvimento do *front-end*, seguiu-se uma fase de testes para avaliar a corretude, analisar métricas de qualidade ou comparar diferentes implementações, dependendo do caso de teste. Os resultados obtidos estão descritos a seguir.

### 7.1 Métodos Numéricos

Realizamos testes para verificar a corretude dos métodos numéricos que usamos, o SLSQP, o Basinhopping e o Taguchi. Usamos funções de teste para otimização com mínimo global conhecido, e verificamos se era igual à saída do método numérico. A tabela 1 possui os resultados dos testes do método Basinhopping, a tabela 2 possui os de SLSQP e a tabela 3 do Método Taguchi. A definição de cada função escolhida e seus domínios de busca foi obtida da literatura [21]. As linhas marcadas em cinza mostram funções na qual o método numérico não achou o mínimo global.

Nome da função	Mínimo calculado	Mínimo global
Easom	$f(100.0,100.0)=-0.0$	$f(3.14,3.14)=-1.0$
Himmelblaus	$f(-3.78,-3.28)=0.0$	$f(3,2)=0$
Matyas	$f(-0.0,-0.0)=0.0$	$f(0,0)=0.0$
Mccormick	$f(2.59,1.59)=1.23$	$f(-0.55,-1.55)=-1.91$
Schaffer4	$f(98.73,98.64)=0.5$	$f(0,1.25)=0.29$
Three hump camel	$f(-0.0,-0.0)=0.0$	$f(0,0)=0.0$

Tabela 1: Testes de mínimo global para Basinhopping.

Nome da função	Mínimo calculado	Mínimo global
Easom	$f(100.0, 100.0) = -0.0$	$f(3.14, 3.14) = -1.0$
Himmelblaus	$f(-2.85, 3.08) = 0.17$	$f(3, 2) = 0$
Matyas	$f(-0.65, -0.65) = 0.02$	$f(0, 0) = 0.0$
Mccormick	$f(2.51, 1.51) = 1.24$	$f(-0.55, -1.55) = -1.91$
Schaffer4	$f(100.0, 100.0) = 0.5$	$f(0, 1.25) = 0.29$
Three hump camel	$f(0.0, -0.0) = 0.0$	$f(0, 0) = 0.0$

Tabela 2: Testes de mínimo global para SLSQP.

Nome da função	Mínimo calculado	Mínimo global
Easom	$f(3.14, 3.14) = -1.0$	$f(3.14, 3.14) = -1.0$
Himmelblaus	$f(3.0, 2.0) = 0.0$	$f(3, 2) = 0$
Matyas	$f(0.0, 0.0) = 0.0$	$f(0, 0) = 0.0$
Mccormick	$f(-0.55, -1.55) = -1.91$	$f(-0.55, -1.55) = -1.91$
Schaffer4	$f(-98.51, -98.51) = 0.5$	$f(0, 1.25) = 0.29$
Three hump camel	$f(0.0, 0.0) = 0.0$	$f(0, 0) = 0.0$

Tabela 3: Testes de mínimo global para Método Taguchi.

Dos três algoritmos, o Método Taguchi encontrou o resultado correto com maior frequência. Dessa forma, ele foi utilizado nas etapas posteriores de projeto.

## 7.2 Cálculo da Posição Ideal para Instalação

Os parâmetros e variáveis do problema de otimização foram utilizados conforme o texto desenvolvido no capítulo “Aspectos Conceituais”.

Criamos testes para verificar se a função de cálculo de área total funcionava corretamente com os métodos numéricos. Selecionamos uma área retangular nas proximidades da Cidade Universitária da USP. A área de cobertura atual na região é de  $19.85 km^2$ . Rodamos o algoritmo com o método Taguchi para cálculo das posições de duas novas antenas. A nova área de cobertura foi  $21.21 km^2$ . O resultado está na figura 14.

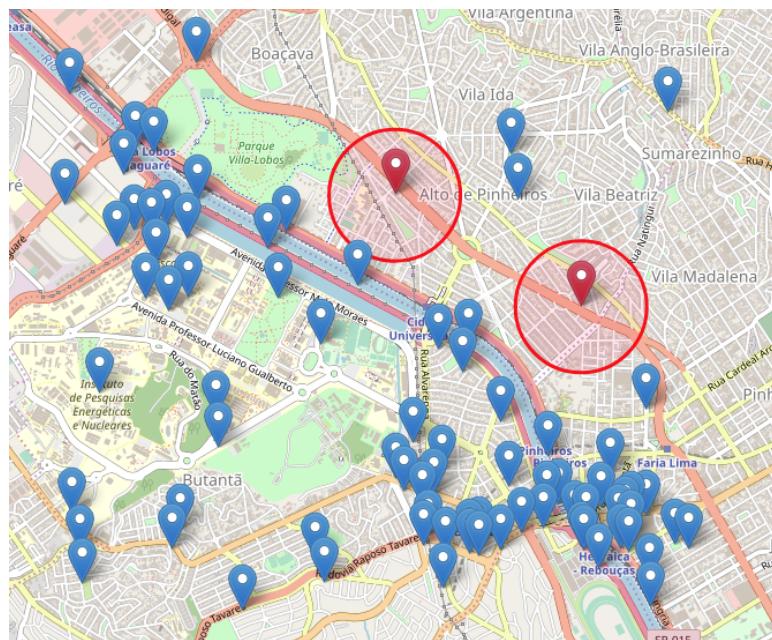


Figura 14: Cálculo da nova posição de otimização pelo método Taguchi.

Repetimos o processo para os métodos Basinhopping e SLSQP. O método primeiro conseguiu uma nova área de cobertura de  $21.27\text{km}^2$ , e o segundo conseguiu  $20.99\text{km}^2$ . Os resultados estão nas figuras 15 e 16, respectivamente.

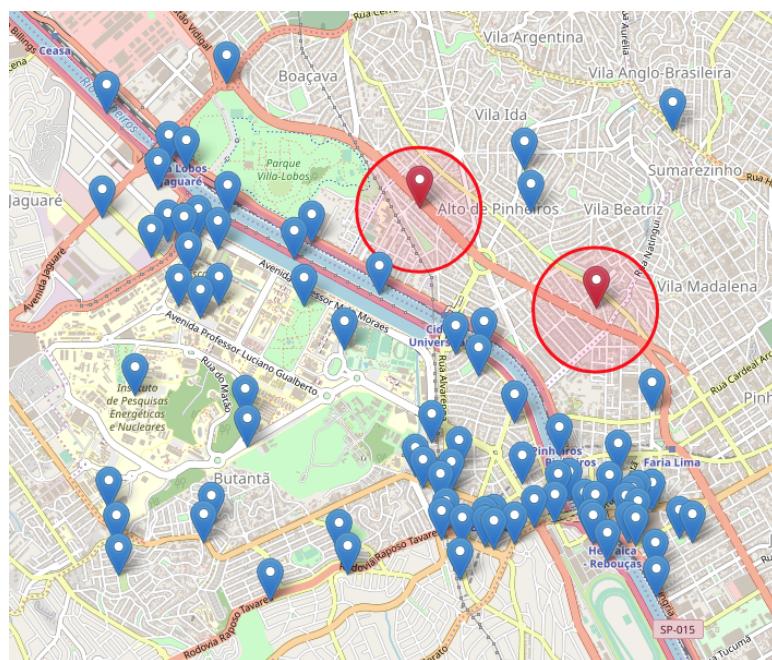


Figura 15: Cálculo da nova posição de otimização pelo método Basinhopping.

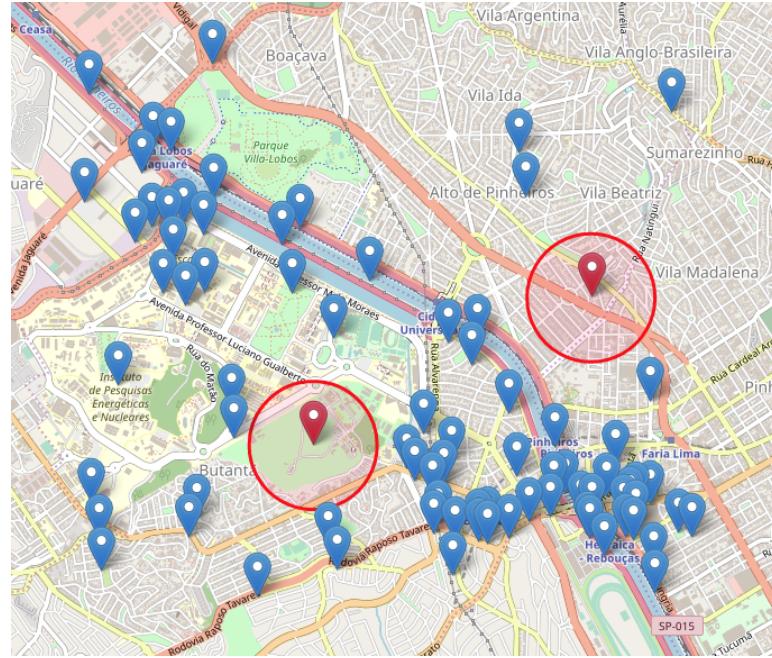


Figura 16: Cálculo da nova posição de otimização pelo método SLSQP.

Como visto anteriormente, optamos por seguir utilizando o Método Taguchi, pois havia se saído melhor nos testes de funções a serem minimizadas.

Testamos também o caso de infraestrutura ausente, ou seja, quando não há antenas instaladas na região.

O resultado do método Taguchi para duas novas antenas está na figura 17.

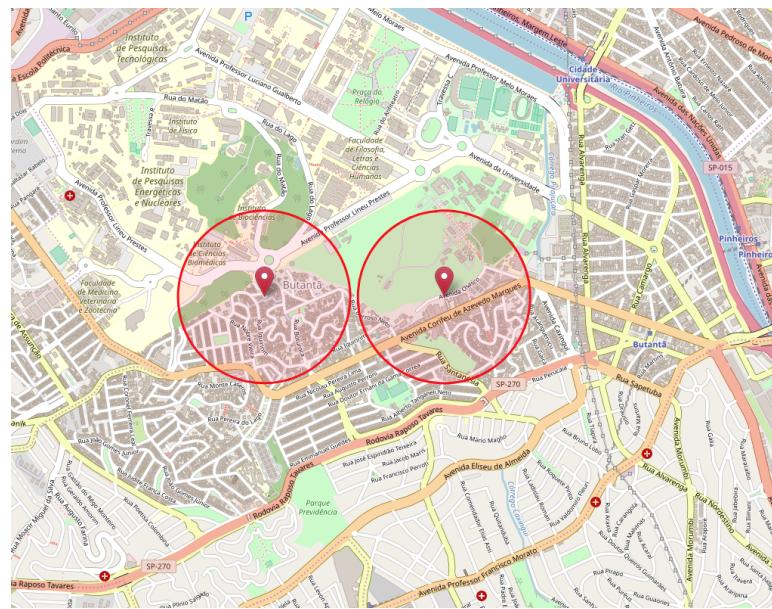


Figura 17: Método Taguchi com infraestrutura ausente.

Repetimos o experimento para oito novas antenas. Como nossa implementação do método Taguchi só suporta duas novas antenas, usamos o método *Basinhopping*. O resultado está na figura 18

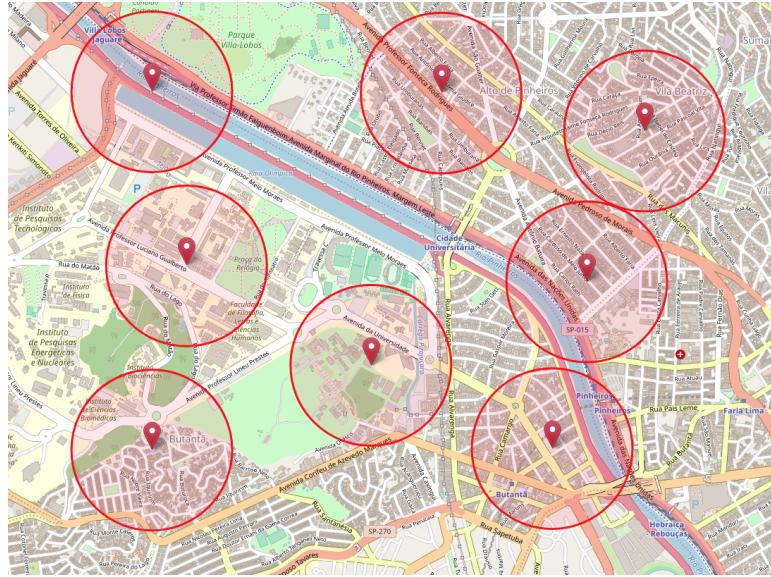


Figura 18: Método Taguchi com infraestrutura ausente.

Como pode ser visto pelas figuras, nesses casos os algoritmos distribuem as antenas evitando sobreposição entre elas.

### 7.3 Código

Cada integrante avaliou o código do outro em termos de organização, eficiência, legibilidade e coesão, para garantir programas com qualidade elevada e seguindo boas práticas de engenharia de software. Dessa forma, conseguimos obter resultados satisfatórios neste quesito, que atendesse às expectativas de qualidade do grupo.

Consideramos que o ponto mais fraco da implementação foram os testes, pela falta de testes unitários ou de integração automatizados. A isto atribuímos vários fatores, dentre eles a falta de tempo para desenvolvimento e a inexperiência com *frameworks* de teste para Django e Vue. Isto seria a prioridade do grupo em revisões futuras do código.

O código fonte das implementações deste trabalho foi integralmente disponibilizado como código aberto no GitHub, separadas em dois repositórios: um para o *back-end* Django, com instruções de instalação para desenvolvimento local [22]; e outro para o *framework* de *front-end* escrito em Vue [23]. Além disso, esta monografia em si também está disponível no GitHub [24].

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do trabalho, conseguimos atingir o principal objetivo de criar o produto da especificação mínima, com a qualidade esperada pelos integrantes. Nas seções a seguir, falaremos sobre a experiência do grupo na implementação deste projeto, comentários sobre os resultados e quais os próximos passos a serem seguidos após o TCC.

### 8.1 Conclusões do Projeto de Formatura

Em nossa visão, conseguimos seguir satisfatoriamente o cronograma estabelecido no capítulo de “Metodologia do Trabalho”, implementando os requisitos definidos para o MVP. Acima de tudo, ficamos contentes com o resultado final obtido, e temos crença de que o produto atual ainda pode ser desenvolvido para atingir uma alta qualidade para o mercado de instalação de antenas celulares. Um novo objetivo, do ponto de vista dos requisitos, seria obter resultados mais rápidos e mais precisos, buscando-se alternativas à solução de otimização atual.

Também conseguimos expandir nossos conhecimentos sobre aplicações web acerca do *design*, desenvolvimento e *deployment*. Ainda melhoramos nossa confiança nos conhecimentos prévios dos *frameworks* Django e Vue, além das ferramentas para disponibilizar serviços na web e PostgreSQL.

Porém, não conseguimos verificar um dos objetivos iniciais: assegurar que o *design* do produto final é simples. Para tal, seria necessário realizar os testes de UX programados, com foco nesse parâmetro como objetivo, para verificar a facilidade de uso da interface.

Houve dificuldades ao longo da implementação que o grupo conseguiu eventualmente resolver ou contornar. Sentimos que o principal fator que atrapalhou no projeto foi a falta de tempo para conclusão das tarefas do cronograma, já que houve muitos trabalhos das demais disciplinas competindo pelo tempo dedicado aos estudos.

Também sentimos falta de testes de desempenho dos algoritmos de otimização para

uma análise mais detalhada, mas não puderam ser efetuadas pela mesma restrição de tempo. De qualquer forma, estes testes, mais os testes de UX, serão essenciais no futuro desenvolvimento do MVP, onde espera-se uma boa coleta de métricas para avaliar rigorosamente os objetivos e resultados do trabalho.

Outro requisito não-funcional que não pode ser implementado no primeiro MVP foi o de segurança, especificamente com relação ao permissionamento de usuários. Ele está mais ligado aos casos de uso adicionais, que serão comentados na última seção deste capítulo.

## 8.2 Contribuições

Todo o código desenvolvido pelo grupo nos repositórios foi feito do zero. As contribuições externas vieram por meio de bibliotecas, dados e serviços livres:

- **Banco de dados e extensões:** PostgreSQL, PostGIS, GEOS, GDAL, PROJ.4, GeoIP2.
- **Back-end:** Django, Django REST Framework, numpy, scipy, Google Earth Engine API.
- **Servidor:** Nginx, Gunicorn, Let's Encrypt.
- **Front-end:** Vue, Vuetify, axios, Leaflet, Leaflet.MarkerCluster, Leaflet.draw, Cruip.
- **Ferramentas:** GitHub, Netlify, LaTeX.
- **Dados:** Telebrasil, OpenCellID, Google Earth Engine.

## 8.3 Perspectivas de Continuidade

Ao longo da especificação de requisitos e da implementação, alguns aspectos foram deixados de lado por fugirem do escopo do MVP. Porém, eles são interessantes em um produto final, agregando funcionalidades desejáveis aos *stakeholders*. Além disso, também será interessante detalhar o processo de criação de empresa para a distribuição do produto, uma vez que o principal objetivo deste TCC foi gerar um produto mais atraente.

### 8.3.1 Plano de Negócio

Foi feito um estudo de implementação do projeto do MVP na concepção de um produto real; em outras palavras, as etapas para prosseguir com a criação de uma *startup*. Em especial na própria Escola Politécnica, há uma organização específica para promoção dessa cultura, chamada Núcleo de Empreendedorismo da USP (NEU), que fomenta e dá suporte à criação de pequenas empresas fundadas por alunos [25].

Em linhas gerais, estabelecemos um processo de implantação da empresa após a conclusão do TCC, seguindo-se as recomendações do próprio NEU:

1. Entrar em contato com o NEU e avaliar recursos disponíveis no seu programa de pré-aceleração, como contatos do mercado e mentoria de empreendedorismo.
2. Completar a *landing page* com os principais pontos fortes do produto, e divulgar para os *stakeholders*. Assim, será possível obter *feedback* sobre o interesse do mercado – pelo número de acessos à página e pelo preenchimento de formulários de notificações por e-mail – além de estabelecer uma base de clientes realmente interessada no negócio.
3. Utilizando-se como base o conceito de *Business Model Canvas*, elaborar um modelo de negócio, listando os objetivos e medidas a serem tomados. A princípio, seria dada ênfase na escolha de parceiros e clientes, com foco secundário nas atividades e recursos da empresa.
4. Validar MVP com os primeiros usuários do sistema selecionados no passo 2. Com isso, será possível obter *feedback* e métricas de uso, estabelecidas de acordo com as seguintes hipóteses (baseadas nos nossos recursos não-funcionais):
  - O produto é de fácil utilização.
  - O sistema é útil para os instaladores de antenas.
  - Os clientes possuem confiança na qualidade do produto.
5. Com os dados coletados acima, aperfeiçoar o produto incrementalmente, em preparação para reorganizar a estrutura da empresa. Isso permite aumentar o número de clientes e a própria empresa em contrapartida, seguindo-se a ajuda do NEU nesta etapa.

Desta forma, podemos estabelecer a *startup* de maneira adequada ao mercado e voltada a resultados positivos, tanto na valorização do produto quanto ao amadurecimento da empresa no ecossistema de empreendedorismo.

### 8.3.2 Dados Adicionais

Da parte técnica do projeto, mais duas bases de dados que foram estudadas para uso foram: a G-Econ [26], da Universidade de Yale, que apresenta os dados de paridade de poder de compra geograficamente; e o SIMET-NIC [27], com a qualidade do acesso de Internet no Brasil. Estas duas bases de dados, em conjunto com as anteriores, podem permitir uma análise aprofundada de parâmetros ótimos para a instalação de novas antenas e avaliação da estrutura pré-existente; porém, a relação destes dados não cabe ao nosso caso de uso principal desta monografia. Elas podem ser úteis em uma análise futura, ao trabalhar em conjunto com os *stakeholders* para análises de instalação levando-se em conta parâmetros socioeconômicos, que seriam mais interessantes para uma empresa de telecomunicação em termos de análise de risco.

### 8.3.3 Descrição dos Casos de Uso Adicionais

Alguns casos de uso adicionais foram elaborados para complementar o capítulo “Especificação de Requisitos do Sistema”, porém foram deixados para uma implementação futura, já que não afetam a demonstração do MVP. Eles foram descritos no Apêndice A.

## REFERÊNCIAS

- [1] Forsk. *Atoll LTE / LTE-A Planning Software* — Forsk. Disponível em: <http://www.forsk.com/ltelte-pro>. Acesso em: 1º de março de 2018.
- [2] TUDE, Eduardo. *Os desafios para a ampliação dos serviços de telecomunicações nos municípios*: Workshop. [22 de agosto de 2018]. Fiesp, São Paulo.
- [3] MyTower. *MyTower - Aluguel e Venda de Terrenos e Topos para Operadoras de Telecom*. Disponível em: <http://www.mytower.com.br/>. Acesso em: 1º de março de 2018.
- [4] Skysites. *Skysites*. Disponível em: <http://skysites.com/>. Acesso em: 1º de março de 2018.
- [5] OpenGIS Consortium, Inc. *Simple Feature Access - Part 2: SQL Option*. Disponível em: <https://www.opengeospatial.org/standards/sfs>. Acesso em: 24 de novembro de 2018.
- [6] LEE, S.; LEE, S.; KIM, K.; KIM, YH. *Base Station Placement Algorithm for Large-Scale LTE Heterogeneous Networks*. PLoS ONE 10(10), 2015.
- [7] KARULKAR, S. A.; OH, JY. *Optimal Placement of Base Station for Cellular Network Expansion*. Issues in Information Systems, volume 17, edição II, pg. 215-221, 2016.
- [8] WEGMANN, A.; VIERING I.; KLEIN, A. *A Joint Optimization of Antenna Parameters in a Cellular Network Using Taguchi's Method*. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011.
- [9] IZARIO, Bruno R. F. *Comparação do Sistema LTE Operando na Faixa de 2,5 GHz e 700 MHz*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.
- [10] JARVIS, Neil. *Fundamentals of a RF Design*. Rohde & Schwarz, 2017.
- [11] Telebrasil. *Mapa de ERBs Brasil (antenas)*. Disponível em: <http://www.telebrasil.org.br/panorama-do-setor/mapa-de-erbs-antenas>. Acesso em: 31 de janeiro de 2018.
- [12] Unwired Labs. *OpenCellID - Largest Open Database of Cell Towers & Geolocation by Unwired Labs*. Disponível em: <https://opencellid.org/>. Acesso em: 1º de março de 2018.
- [13] Google Earth. *Google Earth Engine*. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em: 16 de março de 2018.
- [14] Interactive Digital Media GmbH. *Mobile Country Codes (MCC) and Mobile Network Codes (MNC)*. Disponível em: <http://www.mcc-mnc.com>. Acesso em: 10 de outubro de 2018.

- [15] biodiv (GitHub). *anycluster*. Disponível em: <https://github.com/biodiv/anycluster>. Acesso em: 6 de maio de 2018.
- [16] EvgeneOskin (GitHub). *django-geohash-cluster*. Disponível em: <https://github.com/EvgeneOskin/django-geohash-cluster>. Acesso em: 8 de setembro de 2018.
- [17] SciPy.org. Disponível em: <https://www.scipy.org>. Acesso em: 13 de março de 2018.
- [18] NumPy. Disponível em: <https://www.numpy.org>. Acesso em: 13 de março de 2018.
- [19] Cruip. Disponível em: <https://cruip.com>. Acesso em: 12 de dezembro de 2018.
- [20] Netlify. Disponível em: <https://www.netlify.com>. Acesso em: 7 de setembro de 2018.
- [21] Wikipedia. *Test functions for optimization*. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Test\\_functions\\_for\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Test_functions_for_optimization). Acesso em: 28 de novembro de 2018.
- [22] EpicEric (GitHub). *base\_stations\_django*. Disponível em: [https://github.com/EpicEric/base\\_stations\\_django](https://github.com/EpicEric/base_stations_django). Acesso em: 21 de fevereiro de 2018.
- [23] EpicEric (GitHub). *base\_stations\_vue*. Disponível em: [https://github.com/EpicEric/base\\_stations\\_vue](https://github.com/EpicEric/base_stations_vue). Acesso em: 22 de julho de 2018.
- [24] EpicEric (GitHub). *tcc*. Disponível em: <https://github.com/EpicEric/tcc>. Acesso em: 27 de janeiro de 2018.
- [25] Núcleo de Empreendedorismo da USP. *Guia NEU de Suporte aos Alunos*. Disponível em: [http://www.uspemprende.org/ebook/](http://www.uspempreende.org/ebook/). Acesso em: 27 de novembro de 2018.
- [26] Yale University. *Geographically based Economic data -- Brazil*. Disponível em: <https://gecon.yale.edu/brazil>. Acesso em: 24 de março de 2018.
- [27] Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR. *Sistema de Medição de Tráfego Internet*. Disponível em: <http://simet.nic.br/mapas-app.html>. Acesso em: 24 de março de 2018.

# APÊNDICE A – CASOS DE USO ADICIONAIS

**Caso de Uso 8:** Cadastrar usuário no sistema.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o cadastro de usuários no sistema

**Evento iniciador:** Usuário clica no botão “Cadastrar usuário”.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário não logado no sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica no botão “Cadastrar usuário”.
2. Sistema exibe página de cadastro.
3. Usuário digita nome, e-mail, senha e confirmação de senha.
4. Sistema valida dados e envia e-mail de confirmação para usuário.

**Pós-condições:** Usuário cadastrado no sistema com confirmação de e-mail pendente.

**Extensões:**

1. Usuário já cadastrado: Sistema exibe mensagem de erro (passo 4)
2. Senha não é igual à confirmação de senha: Sistema exibe mensagem de erro (passo 4)

**Inclusões:** Buscar usuário (passo 4)

**Caso de Uso 9:** Confirmação de e-mail.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de confirmação de um e-mail.

**Evento iniciador:** Usuário acessa a URL correspondente à confirmação de seu e-mail.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário cadastrado no sistema com e-mail não confirmado.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário acessa a URL correspondente à confirmação de seu e-mail.
2. Sistema confirma a validade do e-mail do usuário.
3. Sistema redireciona o usuário para página inicial.

**Extensões:** URL de confirmação inválida: Sistema mostra uma mensagem de erro e redireciona o usuário para a página de *login* (passo 2).

**Inclusões:** --

#### **Caso de Uso 10: Adicionar nova ERB**

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de adição de novas ERBs na base de dados.

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Adicionar ERB”.

**Atores:** Administrador, Funcionário.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Adicionar ERB” e clica em um ponto no mapa.
2. Sistema exibe formulário com dados a serem cadastrados sobre a nova ERB.
3. Usuário preenche formulário e clica em “Salvar”.
4. Sistema salva nova ERB.
5. Sistema exibe mapa com ERBs.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs apresentado e nova ERB salva na base de dados.

**Extensões:** Dados inválidos: Sistema exibe mensagem de erro e exibe formulário novamente (passo 4).

**Inclusões:** Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (pré-condição e passo 5).

#### **Caso de Uso 11: Remover ERB**

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de remoção de uma ERB da base de

dados.

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Remover ERB”.

**Atores:** Administrador, Funcionário.

**Pré-condições:** Usuário logado no sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Remover ERB” e seleciona uma ERB no mapa.
2. Sistema pergunta se usuário realmente deseja remover ERB.
3. Usuário responde “Sim”.
4. Sistema remove ERB.
5. Sistema exibe mapa com ERBs.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs apresentado e ERB escolhida pelo usuário removida da base de dados.

**Extensões:** --

**Inclusões:** Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (pré-condição e passo 5).

**Caso de Uso 12:** Exibir ERBs às quais o celular do usuário está conectado

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de exibição de ERBs às quais o usuário está conectado

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Antenas conectadas”.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário logado em um celular, na página inicial do sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Antenas conectadas”.
2. Sistema exibe um mapa com as ERBs conectadas em destaque.

**Pós-condições:** Mapa com ERBs conectadas apresentado.

**Extensões:** Celular não está conectado a ERB nenhuma: Sistema exibe mensagem de erro (passo 2).

**Inclusões:** Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (passo 2).

**Caso de Uso 13:** Exibir mapa com qualidade do sinal por operadora.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de exibição de qualidade de sinal por operadora.

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Qualidade de sinal”.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário logado, na página inicial do sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Qualidade de sinal”.
2. Sistema exibe um mapa centrado na localização atual do usuário.
3. Usuário clica em um ponto do mapa.
4. Sistema exibe informações de qualidade de sinal por operadora.

**Pós-condições:** Informações de qualidade de sinal apresentadas.

**Extensões:** --

**Inclusões:** Caso de uso 3 “Exibir mapa” (passo 2)

**Caso de Uso 14:** Estimar geolocalização do usuário.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de estimar a geolocalização do usuário a partir das antenas às quais ele está conectado.

**Evento iniciador:** Usuário clica na opção “Estimar geolocalização”.

**Atores:** Administrador, Funcionário ou Usuário não-comercial.

**Pré-condições:** Usuário logado em um celular, na página inicial do sistema.

**Sequência de Eventos:**

1. Usuário clica na opção “Estimar geolocalização”.
2. Sistema exibe um mapa centrado na localização estimada do usuário.
3. Sistema mostra as antenas aos quais o usuário está conectado em destaque.

**Pós-condições:** Localização estimada do usuário e antenas conectadas são mostradas na tela.

**Extensões:**

1. Número de ERBs conectadas são insuficientes para estimar posição exata: Sistema exibe um mapa com a localização estimada do usuário representada por um círculo. (passo 2)
2. Usuário não está conectado a nenhuma ERB: Sistema exibe mensagem de erro. (passo 2)

**Inclusões:** Caso de uso 4 “Exibir mapa com ERBs” (passo 2).

**Caso de Uso 15:** Listar usuários do sistema

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de listar usuários do sistema.

**Evento iniciador:** Administrador clica na opção “Listar usuários”.

**Atores:** Administrador

**Pré-condições:** Administrador logado no sistema, na página inicial.

**Sequência de Eventos:**

1. Administrador clica na opção “Listar usuários”.
2. Sistema busca usuários e os exibe em uma lista.

**Pós-condições:** Lista de usuários apresentada.

**Extensões:** --

**Inclusões:** Buscar usuários no sistema (passo 2)

**Caso de Uso 16:** Modificar papel de usuário.

**Descrição:** Este caso de uso descreve o processo de modificar papel de usuário.

**Evento iniciador:** Administrador seleciona a opção “Funcionário” no campo “Papel do usuário”

**Atores:** Administrador

**Pré-condições:** Administrador logado no sistema, na página listar usuários.

**Sequência de Eventos:**

1. Administrador seleciona um usuário de interesse.
2. Administrador seleciona a opção “Funcionário” no campo “Papel do usuário”.
3. Administrador clica em “Aplicar”.
4. Sistema modifica usuário escolhido para ele ter papel de Funcionário.

**Pós-condições:** Usuário escolhido tem papel de Funcionário.

**Extensões:** --

**Inclusões:** Caso de uso 15 “Listar usuários do sistema” (pré-condição)