

**INSTITUTO
FEDERAL**
Pernambuco

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Campus Garanhuns

Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

JACIEL LUCAS CORDEIRO DOS SANTOS

**ALOCAÇÃO DE ELETROPOSTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE
CASO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GARANHUNS-PE**

Garanhuns – PE

2025

JACIEL LUCAS CORDEIRO DOS SANTOS

**ALOCAÇÃO DE ELETROPOSTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE
CASO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GARANHUNS-PE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Pernambuco, campus
Garanhuns, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Diego Soares Lopes

Garanhuns – PE

2025

S237a

Santos, Jaciel Lucas Cordeiro dos

Alocação de eletroposto para veículos elétricos: estudo de caso na rede de distribuição de Garanhuns-PE / Jaciel Lucas Cordeiros dos Santos; orientador Diego Soares Lopes, 2025.

61f. : il.

Orientador: Diego Soares Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Energia elétrica - transmissão. 2. Recursos energéticos - Brasil. 3. Energia elétrica - consumo. 4. Eficiência energética - Pernambuco. 5. Veículos elétricos. I. Título. II. Lopes, Diego Soares (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 621.319

Louise Machado Freire Dias – CRB4/2267

JACIEL LUCAS CORDEIRO DOS SANTOS

**ALOCAÇÃO DE ELETROPOSTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: ESTUDO DE
CASO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GARANHUNS-PE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Pernambuco, campus
Garanhuns, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____/____/____

Prof. Dr. Diego Soares Lopes (IFPE, *campus* Garanhuns)
Orientador

Prof. Dr. Wilker Victor da Silva Azevêdo (IFPE, *campus* Garanhuns)
Avaliador interno

Profa. Dra. Daphne De La Torre Barros (IFPE, *campus* Recife)
Avaliador externo

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente e me incentivou a seguir em frente nos momentos mais desafiadores. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho marca o encerramento de um ciclo repleto de desafios, aprendizados e crescimento. Por isso, expresso, com gratidão, meu reconhecimento àqueles que, de alguma forma, tornaram esta conquista possível.

A Deus, por me conceder força, perseverança e discernimento ao longo dessa trajetória.

À minha família, em especial à minha mãe, Cícera, pelo amor incondicional, pelo incentivo e por sempre acreditar em mim, mesmo nos momentos de incerteza. Vocês foram e sempre serão minha base e motivação.

Aos colegas e amigos Felipe Martins, Ingrid Matias, Flavio Fernando e José Vitor, que compartilharam comigo essa jornada, dividindo desafios, conquistas e momentos inesquecíveis. O apoio e a parceria de vocês foram essenciais para tornar essa caminhada mais leve e enriquecedora.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica, que contribuíram para minha formação acadêmica e despertaram em mim o interesse pelo conhecimento e pela inovação.

E, por fim, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para minha formação e para a concretização deste trabalho. Minha gratidão eterna!

*"O importante não é prever o futuro, mas torná-lo possível."
— Antoine de Saint-Exupéry*

RESUMO

A crescente adoção de veículos elétricos (VEs) impõe desafios à infraestrutura elétrica. Este trabalho propõe uma metodologia para otimizar a alocação e capacidade de eletroposto de carga rápida na rede de distribuição de Garanhuns, considerando aspectos técnicos e sociais. O estudo utiliza modelagem computacional no software OpenDSS, trazendo a simulações de fluxo de potência e diversos cenários de teste para identificar as localizações ideais dos eletropostos com menor impacto na qualidade de energia. No presente estudo, foram analisados três alimentadores da rede elétrica de Garanhuns, sendo eles os alimentadores 220, 250 e 254, avaliando índices de qualidade de tensão e a capacidade máxima de acomodação. Os alimentadores estão distribuídos em diferentes regiões da cidade. Os resultados da análise indicaram que o alimentador 254 apresenta a maior capacidade de acomodação entre os alimentadores estudados, sendo capaz de suportar até 663.000 kW em um ponto de conexão localizado no bairro Novo Heliópolis. Em relação aos demais alimentadores analisados, destaca-se também o alimentador 250, que possui uma localização estratégica no bairro Heliópolis, apresentando capacidade para suportar uma potência máxima de 306.200 kW em seu ponto de conexão. A metodologia demonstrou ser eficaz na minimização dos impactos na rede e garantindo a viabilidade da mobilidade elétrica na cidade. Conclui-se que a abordagem proposta pode ser aplicada em outras cidades, contribuindo para um planejamento eficiente da infraestrutura de recarga.

Palavras-chaves: Veículos elétricos. Infraestrutura de recarga. Eletropostos. Planejamento energético.

ABSTRACT

The growing adoption of electric vehicles (EVs) poses challenges to electrical infrastructure. This work proposes a methodology for optimizing the allocation and capacity of fast charging stations in the Garanhuns distribution network, considering technical and social aspects. The study uses computational modeling in the OpenDSS software, bringing power flow simulations and various test scenarios for identifying the ideal locations of charging stations with the least impact on energy quality. In the present study, three feeders from the Garanhuns electrical network were analyzed, namely feeders 220, 250, and 254, evaluating voltage quality indices and maximum accommodation capacity. The feeders are distributed in different regions of the city. The results of the analysis indicated that feeder 254 has the highest accommodation capacity among the feeders studied, being capable of supporting up to 663,000 kW at a connection point located in the Novo Heliópolis neighborhood. About the other feeders analyzed, feeder 250 also stands out, as it has a strategic location in the Heliópolis neighborhood and the capacity to support a maximum power of 306,200 kW at its connection point. The methodology proved to be effective in minimizing impacts on the network and ensuring the viability of electric mobility in the city. It is concluded that the proposed approach can be applied in other cities, contributing to efficient charging infrastructure planning.

Keywords: Electric vehicles. Charging infrastructure. Electrostatics. Energy planning.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Classificação dos veículos elétricos | 20 |
| Figura 2 – Tipos de conectores para carregamento dos veículos elétricos | 23 |
| Figura 3 – Visão das linhas de distribuição dos alimentadores selecionados..... | 32 |
| Figura 4 – Visão das linhas de distribuição do alimentador 220. | 33 |
| Figura 5 – Visão das linhas de distribuição do alimentador 250. | 34 |
| Figura 6 – Visão das linhas de distribuição do alimentador 254. | 35 |
| Figura 7 – Curva de demanda elaborada para o eletroposto proposto..... | 39 |
| Figura 8 – Fluxograma do Algoritmo 1. | 40 |
| Figura 9 – Fluxograma do Algoritmo 2. | 42 |
| Figura 10 – Localização eletroposto e falha no alimentador 220..... | 49 |
| Figura 11 – Localização eletroposto e falha no alimentador 250..... | 50 |
| Figura 12 – Localização eletroposto e falha no alimentador 254..... | 50 |
| Figura 13 – Localizações propostas dos eletropostos em cada alimentador. | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Níveis potência no carregamento por condução..... | 23 |
| Tabela 2 – Parâmetros utilizados para obtenção da curva de demanda. | 38 |
| Tabela 3 – Erro relativo dos índices DRP e DRC do alimentador 220..... | 47 |
| Tabela 4 – Erro relativo dos índices DRP e DRC do alimentador 250..... | 48 |
| Tabela 5 – Erro relativo dos índices DRP e DRC do alimentador 254..... | 48 |
| Tabela 6 – Resultados da capacidade de acomodação. | 48 |
| Tabela 7 – Possíveis localizações do eletroposto. | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABVE | Associação Brasileira do Veículo Elétrico |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BDGD | Base de Dados Georreferenciada de Distribuição |
| BEV | Battery Electric Vehicle (Veículo Elétrico a Bateria) |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| DRC | Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica |
| DRP | Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle (Veículo Elétrico a Célula de Combustível) |
| HEV | Hybrid Electric Vehicle (Veículo Elétrico Híbrido) |
| IEA | International Energy Agency |
| IFPE | Instituto Federal de Pernambuco |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Plug-in) |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| UC | Unidade consumidora |
| V2G | Vehicle-to-Grid (Veículo para Rede) |
| VE | Veículo Elétrico |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|---|
| Ω | Ohm (Unidade de resistência elétrica) |
| S | Siemens (Unidade de condutância elétrica) |
| V | Volt (Unidade de tensão elétrica) |
| kV | Quilovolt (Mil volts) |
| kW | Quilowatt (Mil watts) |
| MW | Megawatt (Mil quilowatts) |
| pu | Por Unidade |
| FP | Fator de potência |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1. Relevância..... | 14 |
| 1.2. Motivação..... | 15 |
| 1.3. Objetivos..... | 16 |
| 1.3.1. Objetivo Geral..... | 16 |
| 1.4. Contribuições..... | 17 |
| 1.5. Organização do Trabalho..... | 17 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 19 |
| 2.1. Mobilidade elétrica..... | 19 |
| 2.2. Classificação dos veículos elétricos..... | 20 |
| 2.3. Tipos de recarga..... | 21 |
| 2.4. Tipos de conectores..... | 22 |
| 2.5. Normas e padrões de recarga de eletropostos..... | 24 |
| 2.6. Impactos causados na rede de distribuição..... | 25 |
| 2.7. Resolução Normativa nº 1.000/2021 da ANEEL..... | 26 |
| 2.8. Capacidade de acomodação..... | 27 |
| 2.9. OpenDSS..... | 28 |
| 2.10. Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD)..... | 29 |
| 3. METODOLOGIA..... | 31 |
| 3.1. Caracterização da rede de distribuição..... | 31 |
| 3.2. Seleção dos alimentadores..... | 32 |
| 3.3. Caracterização dos alimentadores selecionados..... | 33 |
| 3.4. Modelagem do sistema de distribuição..... | 36 |
| 3.5. Definição da curva de demanda do eletroposto..... | 37 |
| 3.6. Desenvolvimento e aplicação do algoritmo de otimização..... | 39 |
| 3.7. Capacidade da acomodação..... | 41 |
| 3.8. Critérios de avaliação dos resultados..... | 43 |
| 3.9. Ambiente computacional..... | 44 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 46 |
| 4.1. Avaliação dos índices de qualidade de tensão..... | 46 |
| 4.2. Determinação da capacidade de acomodação..... | 48 |
| 4.3. Análise da capacidade de acomodação..... | 51 |
| 4.4. Tempo de simulações..... | 52 |

| | |
|--------------------|----|
| 5. CONCLUSÕES..... | 53 |
| REFERÊNCIAS | 55 |
| APÊNDICE | 58 |

1. INTRODUÇÃO

A transição energética global para as fontes mais sustentáveis tem impulsionado significativamente a adoção de veículos elétricos (VEs) como uma alternativa aos veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis. Esta mudança representa uma transformação fundamental no setor de transportes afetando toda uma cadeia produtiva e de serviços, desde fabricantes de automóveis até concessionárias de energia e gestores públicos. O cenário atual de mudanças climáticas e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm influenciado e acelerado essa transição, especialmente no setor de transportes, que é responsável por aproximadamente 25% das emissões globais de CO₂ (IEA, 2023).

A infraestrutura de recarga é um elemento crítico para a popularização dos VEs, podendo ser considerada um dos principais gargalos para sua adoção em larga escala. Esta questão é ainda mais complexa em países em desenvolvimento como o Brasil, em que as redes de distribuição de energia elétrica, especialmente em cidades médias, nem sempre estão preparadas para absorver esta nova demanda. A instalação de eletropostos de carga rápida, em particular, representa um desafio significativo devido à alta potência requerida e aos possíveis impactos na qualidade e estabilidade do fornecimento de energia (Richardson, 2013).

Esta transição energética não é apenas uma mudança tecnológica, mas representa uma transformação socioeconômica profunda que exige planejamento estratégico e colaboração entre múltiplos setores. À medida que os veículos elétricos ganham espaço no mercado global, torna-se evidente que os desafios de infraestrutura precisam ser superados com soluções inovadoras e adaptáveis às realidades locais.

1.1. Relevância

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), o número de VEs em circulação ultrapassou 16,5 milhões no mundo em 2021, marcando um crescimento de 43% em relação ao ano anterior. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Veículos Elétricos, foram emplacados um total de 177.358 unidades de veículos eletrificados leves em 2024, representando um aumento de 89% em relação ao ano anterior, que obteve a marca de 93.927 unidades em 2023 (ABVE, 2025).

A partir disso, o mercado brasileiro de veículos elétricos demonstra uma vitalidade surpreendente, com taxa de crescimento que supera significativamente a média global, sinalizando uma receptividade crescente dos consumidores nacionais à mobilidade sustentável, mesmo diante dos desafios infraestruturais que persistem no país. Esse avanço tem sido impulsionado por políticas públicas favoráveis, inovações tecnológicas e uma conscientização crescente sobre a crise climática.

De acordo com dados divulgados pela Secretaria Nacional de Trânsito (Senatran), Pernambuco registrou um impressionante aumento de 159% na quantidade de veículos eletrificados durante os três primeiros meses de 2024. Neste período, o estado contabiliza um total de 7.900 automóveis que utilizam tecnologia elétrica ou híbrida em suas vias. Um aspecto notável desta distribuição é que mais da metade (58%) destes veículos encontra-se registrada em Recife, enquanto os demais estão dispersos pelos municípios do interior. Este cenário coloca Pernambuco na posição de destaque como o estado nordestino com maior presença de mobilidade elétrica, liderando a transição energética no setor de transportes na região (DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2024).

A partir disso, Garanhuns se posiciona como candidata estratégica para a expansão da infraestrutura de recarga no interior pernambucano, considerando o expressivo crescimento da frota estadual e a concentração atual de veículos na capital. A implementação de eletropostos na cidade poderia não apenas atender à demanda local emergente, mas também criar um corredor de mobilidade elétrica que conecte a capital ao interior, fomentando o turismo sustentável e impulsionando o desenvolvimento econômico regional alinhado às novas tecnologias de transporte.

1.2. Motivação

A motivação para este trabalho surgiu da identificação de uma lacuna significativa no planejamento da infraestrutura de recarga em cidades médias brasileiras. Embora existam diversos estudos sobre a alocação de eletropostos em grandes centros urbanos, poucos abordam as particularidades das redes de distribuição de cidades de médio porte, onde as restrições técnicas e econômicas apresentam desafios específicos.

A ausência de metodologias adaptadas à realidade dessas cidades pode resultar em investimentos mal dimensionados ou em impactos negativos na qualidade

do fornecimento de energia. A rede de distribuição de Garanhuns possui características próprias como longas distâncias entre subestações e variações significativas de demanda entre diferentes regiões da cidade, que precisam ser consideradas no planejamento da infraestrutura de recarga.

A experiência internacional mostra que o planejamento inadequado dessa infraestrutura pode resultar em problemas como sobrecarga da rede, desequilíbrios de tensão e deterioração da qualidade da energia (MURATORI et al., 2019). A crescente demanda por VEs no mundo, impulsionada por políticas de incentivo e pela maior conscientização ambiental da população, cria uma necessidade urgente de soluções tecnicamente viáveis e economicamente eficientes para a instalação de eletropostos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Estudar o dimensionamento e alocação de eletropostos de carga rápida na rede de distribuição de Garanhuns, maximizando a capacidade de atendimento e minimizando os impactos no sistema elétrico.

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo computacional da rede de distribuição elétrica em Garanhuns para otimização multiobjetivo que considere simultaneamente os aspectos técnicos (de perfil de tensão e carregamento das linhas);
- Implementar um modelo computacional de eletroposto veicular a ser instalado considerando uma curva de demanda diária hipotética baseada pesquisas prévias de implementação de eletropostos que modelaram matematicamente os padrões de utilização;
- Analisar os impactos da instalação dos eletropostos nos indicadores de qualidade da rede de energia, incluindo DRP (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária) e DRC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica);
- Determinar a alocação do eletroposto com menor impacto na qualidade de energia da rede, baseados nos modelos construídos e nas análises realizadas.

1.4. Contribuições

O trabalho oferecerá diretrizes técnicas fundamentadas para o planejamento da expansão da rede, considerando a nova realidade dos VEs, na cidade de Garanhuns em Pernambuco. Os resultados permitirão uma melhor compreensão dos impactos da recarga rápida na rede de distribuição e das medidas necessárias para mitigá-los.

No contexto das políticas públicas, os resultados poderão auxiliar o gestor municipal da cidade na elaboração de programas de incentivo à mobilidade elétrica fornecendo bases técnicas para decisões sobre investimentos em infraestrutura. Adicionalmente, o trabalho contribuirá para o desenvolvimento sustentável da região, alinhando-se aos objetivos globais de redução de emissões de gás carbônico e transição energética.

Para a comunidade local, as contribuições se manifestam na forma de um planejamento mais eficiente da infraestrutura de recarga que poderá acelerar a adoção de VEs na região, resultando em benefícios ambientais e econômicos para a população.

1.5. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, estruturados como apresentado a seguir.

No Capítulo 2 é exposto uma revisão bibliográfica abrangente sobre o tema, abordando algumas metodologias de alocação e dimensionamento de eletropostos. São analisados trabalhos recentes que abordam diferentes aspectos do problema, desde modelos matemáticos de otimização até estudos de caso em diferentes contextos urbanos.

No Capítulo 3 aborda-se informações e características do caso analisado. Focando em dados elétricos do sistema de alimentação; quais os critérios aplicados para seleção dos alimentadores estudados. É detalhada a metodologia proposta para alocação e dimensionamento dos eletropostos. São apresentados o modelo computacional desenvolvido, as restrições técnicas consideradas, os algoritmos utilizados e os procedimentos para obtenção dos resultados. Também são descritos

os dados utilizados para caracterização da rede de distribuição de Garanhuns e os cenários de simulação considerados.

No Capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados através da aplicação da metodologia proposta. São discutidos os pontos ótimos para instalação dos eletropostos, as capacidades recomendadas e os impactos na rede de distribuição. São também apresentadas análises de sensibilidade para diferentes cenários de crescimento da demanda.

Por fim, o Capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho, sintetizando as principais contribuições, discutindo as limitações encontradas e propondo direções para trabalhos futuros. São também apresentadas recomendações práticas para implementação dos resultados obtidos.

O trabalho inclui ainda apêndices com informações complementares sobre os códigos computacionais desenvolvidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre as principais questões relacionadas à mobilidade elétrica e suas integrações em redes de distribuição de energia. Inicialmente alguns conceitos gerais sobre a mobilidade elétrica são introduzidos, seguida pela classificação dos veículos elétricos e os diferentes tipos de recarga disponíveis. Em seguida são abordados infraestrutura de carregamento, tipo de conectores e normas. Por fim, são estudados os impactos causados na rede de distribuição, a capacidade de acomodação e as estratégias de alocação ótima de eletropostos.

2.1. Mobilidade elétrica

A mobilidade elétrica é um dos principais elementos para uma transição energética global, assim como da descarbonização do transporte. Desde os primeiros avanços no século XIX, onde inventores como Ányos Jedlik e Thomas Davenport exploraram motores elétricos, até o mundo dos veículos mais modernos de alta eficiência, os VEs passaram por ciclos de popularidade e declínio. Nos últimos anos, o aumento da eficiência das baterias e o custo decrescente dessa tecnologia impulsionaram a adesão global aos VEs, além de responderem às crescentes preocupações ambientais (IEA, 2023; IPCC, 2023)

As políticas ambientais e regulações também têm desempenhado um papel crucial nesse avanço. Instituições como o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) traz em foco a relevância dos VEs para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Em países europeus, políticas públicas ambiciosas buscam banir veículos movidos a combustíveis fósseis até 2035, estimulando a substituição por alternativas mais sustentáveis.

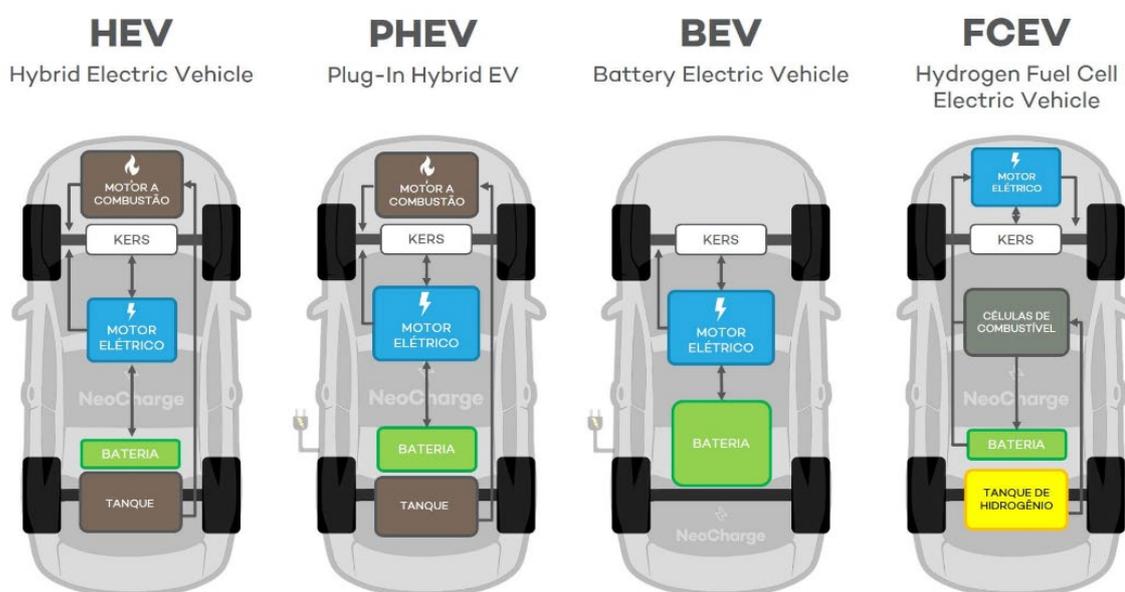
No Brasil, o cenário é promissor, mas desafiador. Embora o mercado de VEs tenha registrado crescimento expressivo nos últimos anos, desafios relacionados à infraestrutura de recarga e à elevada carga tributária ainda limitam uma maior adoção. A matriz energética predominantemente renovável no país cria oportunidades únicas, mas também exige que as redes de distribuição se adaptem às novas demandas (ABVE, 2024).

Entre os benefícios de mobilidade elétrica pode ser incluído a melhoria na qualidade do ar, a redução de emissões dos gases e o avanço tecnológico. Entretanto, é essencial um planejamento robusto para que a integração dos veículos às redes elétricas seja realizada de forma eficiente, visando minimizar os impactos técnicos e financeiros.

2.2. Classificação dos veículos elétricos

Os veículos elétricos podem ser classificados em quatro categorias principais: veículos elétricos híbridos (HEVs), veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs), veículos elétricos a bateria (BEVs) e os veículos elétricos a célula de combustível (FCEVs). Essa classificação baseia-se no tipo de motor e na forma de recarga da bateria. Na Figura 1 é apresentado um esquema das classificações dos VES.

Figura 1 – Classificação dos veículos elétricos



Fonte: NEOCHARGE (2023)

Os BEVs são veículos que dependem estritamente de baterias recarregáveis como fonte de energia, eliminando a necessidade de motores de combustão interna e, conseqüentemente, reduzindo a emissão de gases poluentes. Essa característica posiciona esses veículos como uma alternativa sustentável e alinhada às metas globais de transição energética.

Por serem puramente elétricos, os BEVs podem ser recarregados tanto em tomadas elétricas padronizadas, amplamente disponíveis em residências e estabelecimentos comerciais, quanto em estações de recarga específicas conhecidas como postos elétricos.

Os HEVs utilizam uma combinação de motores de combustão interna e motores elétricos permitindo que aproveitem a energia gerada pela frenagem regenerativa para recarregar suas baterias.

Já os veículos PHEVs trazem uma abordagem que agregam características dos BEVs quanto dos HEVs. A princípio ele é composto de motores elétricos e de combustão interna, mas traz uma particularidade de permitir recarregar a partir de fontes externas. Quando comparado com os HEVs, as baterias dos PHEVs são maiores, o que proporciona percorrer distâncias maiores no modo totalmente elétrico.

Existe o modelo que utiliza célula de combustível, os veículos elétricos a célula de combustível (FCEV), que empregam o hidrogênio como fonte para gerar eletricidade utilizada para alimentar os motores elétricos. Essa tecnologia apresenta vantagens significativas como a rapidez no reabastecimento, superando o tempo necessário para recarregar baterias convencionais.

Além disso, os FCEVs contribuem de forma substancial para a preservação ambiental, pois sua única emissão é vapor d'água, eliminando a liberação de poluentes na atmosfera. Diferentemente de outras categorias de veículos elétricos, os FCEVs não dependem amplamente de regeneração de energia pela frenagem, pois fazem uso de supercapacitores, que fornecem picos de potência instantâneos, permitindo atender rapidamente a demandas energéticas elevadas sem sacrificar a eficiência geral do sistema.

2.3. Tipos de recarga

Os métodos de recarga de VEs variam em função do tempo e a potência fornecida, sendo classificados como recarga lenta, semirrápida e rápida.

- Recarga lenta – Amplamente utilizada em residências de usuários de veículos elétricos, podendo levar de 8 a 20 horas para um ciclo completo.
- Recarga semirrápida – Comum em estações públicas e domiciliares, reduz o tempo para 2 a 6 horas.

- Recarga rápida – Projetada para abastecer 80% da capacidade da bateria em cerca de 30 minutos, utilizando alta potência e corrente contínua, mas com impacto significativo na rede elétrica.

A escolha do tipo de recarga depende de fatores como conveniência, custo e disponibilidade da infraestrutura. Os eletropostos de recarga rápida, por exemplo, são essenciais em zonas urbanas de alta densidade veicular, mas exigem planejamento adequado para evitar alguns problemas como sobrecargas na rede (LUGENERGY, 2025).

2.4. Tipos de conectores

Segundo Caetano (2021), existem duas modalidades principais de carregamento para veículos elétricos: por condução e por transferência de energia sem fio. A condução é a mais utilizada devido ao seu padrão bem definido e à confiabilidade de desempenho. Já o carregamento por transferência sem fio enfrenta desafios relacionados à eficiência, além de apresentar custos elevados e preocupações com segurança.

Os veículos elétricos podem ser carregados por dois tipos de dispositivos: carregadores on-board que são instalados dentro do veículo e associados a potências menores; e carregadores off-board que são externos ao veículo e projetados para lidar com potências mais altas. Ambos os tipos de carregadores estão integrados ao *Electric Vehicle Equipment* (EVSE), um equipamento destinado ao abastecimento elétrico de veículos.

A crescente demanda por carregamentos mais rápidos, eficientes e acessíveis ao público impulsionou o desenvolvimento de estações de recarga rápida, as quais são frequentemente implementadas utilizando a tecnologia EVSE. Um exemplo é o padrão norte-americano SAE J1772, que permite o carregamento de veículos elétricos em diferentes níveis de potência e tempos, sendo amplamente adotado para carregamento em corrente alternada nos níveis 1 e 2. Na Tabela 1 é possível visualizar as características de nível de potencial específicas de carregamento por condução.

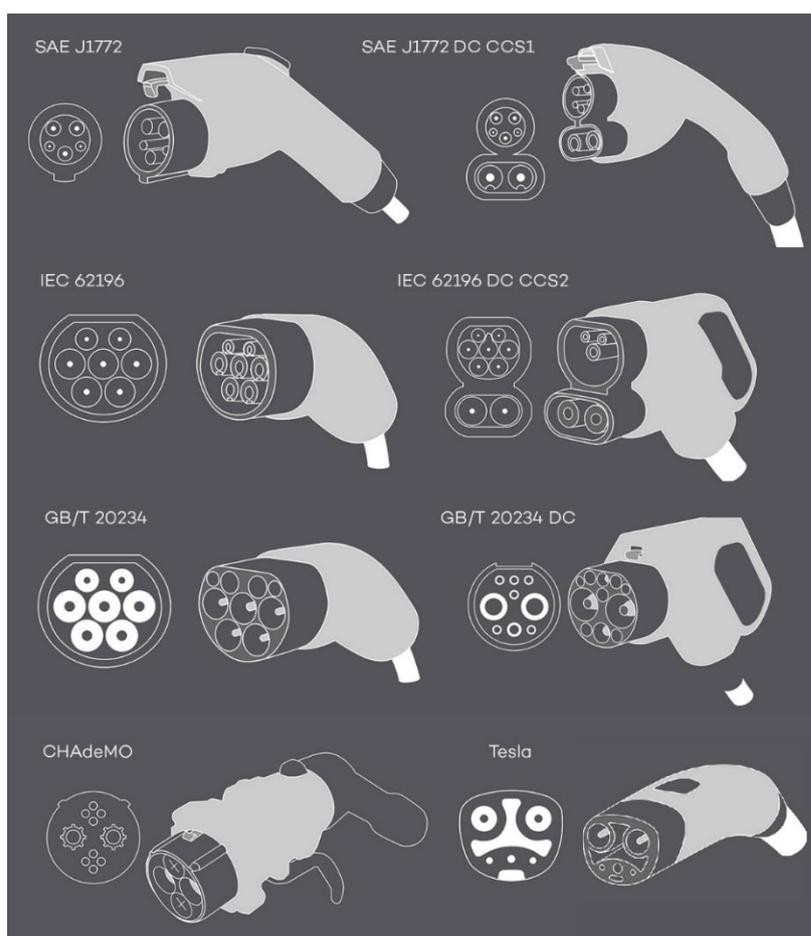
Tabela 1 – Níveis potência no carregamento por condução

| Nível | Natureza da corrente | Potência | Tensão | Corrente |
|---------------|----------------------|-----------------|----------------|---------------|
| 1 | CA | 1,8 kW – 3,7 kW | 250 V – 480 V | Até 16 A |
| 2 | CA | 1,8 kW – 22 kW | 250 V – 480 V | Até 32 A |
| 3 (Rápido) | CC | 50 kW – 300 kW | 600 V – 1000 V | 250 A – 400 A |

Fonte: Adaptação ABNT (2021) e NEOCHARGE.

O conector SAE J1772, que também é chamado de plugue tipo 1, possui características que abrangem requisitos para soquetes, conectores e acoplamentos, garantindo uma interface segura e eficiente entre o veículo elétrico e a estação de carregamento. A figura 2, os tipos de conectores utilizados para carregamento dos veículos elétricos são ilustrados.

Figura 2 – Tipos de conectores para carregamento dos veículos elétricos



Fonte: Adaptado de NEOCHARGE.

2.5. Normas e padrões de recarga de eletropostos

A crescente adoção de veículos elétricos no mundo tem demandado o desenvolvimento e a padronização de normas que regulem os processos de recarga para assegurar a compatibilidade técnica, segurança e a eficiência das operações. Essas normas abrangem desde especificações técnicas para conectores, tensões e potências até diretrizes para instalações elétricas adequadas.

Nos Estados Unidos, a Society of Automotive Engineers (SAE) desempenha um papel fundamental na definição desses padrões, destacando-se o SAE J1772, já mencionado. Já na Europa, prevalece o padrão internacional IEC 62196, que fornece especificações detalhadas para plugues, tomadas e conectores de veículos elétricos, com enfoque na versatilidade entre diferentes fabricantes e infraestruturas de recarga.

A regulamentação no Brasil segue um caminho semelhante com normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que adaptam padrões internacionais ao contexto nacional e às especificidades locais do sistema elétrico. As principais normas brasileiras relacionadas à recarga de veículos elétricos incluem:

- ABNT NBR 5410 – Trata das instalações elétricas de baixa tensão, essenciais para garantir a segurança em recargas realizadas em residências e pequenos estabelecimentos comerciais.
- ABNT NBR 14039 – Estabelece critérios para instalações elétricas de média tensão, abrangendo sistemas que operam entre 1,0 kV e 36,2 kV, sendo fundamental para estações de recarga rápida.
- ABNT NBR 61851 – Norma dedicada aos sistemas de recarga condutiva para veículos elétricos, alinhado às necessidades específicas desse setor em expansão.
- ABNT NBR IEC 62196 – Adapta o padrão internacional homônimo, padronizando plugues, tomadas e conectores para recarga condutiva no Brasil, garantindo compatibilidade e segurança em todos os níveis de carregamento.

2.6. Impactos causados na rede de distribuição

A introdução massiva de veículos elétricos na rede de distribuição de energia representa um marco para a infraestrutura energética como também impõe desafios técnicos significativos. Dentre os impactos mais notáveis estão as quedas de tensão, sobrecarga em transformadores e alimentadores, além do aumento das perdas técnicas. Esses efeitos são amplificados especialmente em sistemas onde existe um tráfego elevado de VEs e recargas não coordenadas, o que pode comprometer a qualidade da energia e a operação eficiente da rede (COSTA, 2024).

O tipo de recarga desempenha um papel crucial nos impactos técnicos. Recarga rápida que geralmente são associadas a eletropostos, demandam altas potências, aumentando os riscos de subtensões, desequilíbrios de tensão e sobrecargas nos equipamentos de distribuição. Subtensões prolongadas, conforme regulamento pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Módulo 8 do PRODIST, podem afetar motores, dispositivos eletrônicos e o desempenho, em geral, das cargas sensíveis conectadas no sistema. Além disso, o desequilíbrio de tensão causado por recargas monofásicas pode prejudicar o desempenho de equipamentos trifásicos, sendo limitado a 2% para sistemas de média tensão, segundo os critérios normativos.

Outro desafio significativo é o agravamento das perdas técnicas que correspondem à energia dissipada no sistema de distribuição devido ao efeito Joule. Eletropostos de recarga rápida podem intensificar essas perdas, especialmente em horários de pico, reduzindo a eficiência da rede e aumentando a necessidade de recondutoramento das linhas para atender à demanda.

Apesar desses desafios, estratégias como o gerenciamento de demanda, a integração de tecnologias Vehicle-to-Grid (V2G) e o uso de sistemas de armazenamento de energia se mostram promissoras. O V2G, por exemplo, permite que os VEs devolvam energia à rede durante períodos de alta demanda ajudando a reduzir os picos e a melhorar o fator de carga. Além disso, a integração de fontes renováveis com baterias de armazenamento pode equilibrar melhor a oferta e a demanda de energia, tornando o sistema mais resiliente e sustentável (Gomes, 2023).

2.7. Resolução Normativa nº 1.000/2021 da ANEEL

A regulamentação estabelecida pela ANEEL em 2021 representa um avanço significativo para o setor elétrico brasileiro, especialmente no que se refere à transição energética e mobilidade elétrica. Este marco regulatório estabelece diretrizes claras que impactam diretamente as estratégias de alocação de eletropostos nas redes de distribuição de energia elétrica do país.

A regulamentação define parâmetros essenciais que influenciam as decisões sobre onde e como implementar infraestruturas de recarga para veículos elétricos. Um dos aspectos fundamentais refere-se à comunicação prévia com a distribuidora, que tem implicação direta no planejamento da alocação de eletropostos, impondo etapas administrativas que podem influenciar o cronograma de implementação dos projetos.

A questão dos custos é particularmente relevante para a tomada de decisão sobre a localização de eletropostos. A norma estabelece critérios de participação financeira que podem atribuir parcialmente ao consumidor interessado os custos de reforço ou expansão da rede necessários para atender a uma nova carga ou ao aumento de carga existente. Este aspecto econômico é crucial para a otimização da alocação de eletropostos, pois cria um incentivo direto para que estas instalações sejam preferencialmente alocadas em pontos da rede que já disponham de capacidade suficiente para absorver a demanda adicional sem necessidade de obras significativas.

Um requisito técnico essencial estabelecido pela regulamentação é a exigência de interoperabilidade para equipamentos de recarga de uso não-privado, que devem ser compatíveis com protocolos abertos de domínio público para comunicação, supervisão e controle remotos. Esta exigência tem implicações diretas na alocação estratégica de eletropostos, favorecendo a implementação de sistemas de gerenciamento inteligente de carga, que podem modular a potência de recarga em função das condições da rede e dos períodos tarifários.

O modelo de negócio também é contemplado pela regulamentação, que permite explicitamente a recarga de veículos elétricos que não sejam do titular da unidade consumidora, inclusive para fins de exploração comercial a preços livremente negociados. Esta disposição cria uma base legal clara para o desenvolvimento de redes comerciais de recarga, incentivando a instalação de eletropostos em locais com

alto potencial de utilização, como estacionamentos comerciais, shopping centers e áreas de grande circulação

A regulamentação também impõe certas limitações, como a restrição à injeção de energia elétrica na rede de distribuição a partir dos veículos elétricos e à participação no sistema de compensação de energia elétrica de microgeração e minigeração distribuída. Esta restrição impacta diretamente as estratégias de alocação que poderiam se beneficiar da tecnologia V2G. No entanto, a norma permite o fluxo bidirecional restrito à mesma unidade consumidora (V2H - Vehicle-to-Home), abrindo possibilidades para aplicações em menor escala, como o uso de veículos para backup de energia ou para otimização do consumo próprio, especialmente valiosas em locais com tarifação horária.

A participação das distribuidoras no mercado de eletropostos também é contemplada pela regulamentação, permitindo que estes agentes com profundo conhecimento técnico da rede e capacidade de investimento substancial participem diretamente deste mercado. Do ponto de vista da alocação, isto pode ser estrategicamente benéfico, pois as distribuidoras têm acesso privilegiado a informações sobre a capacidade da rede e podem identificar com maior precisão os pontos ideais para instalação desta infraestrutura. A norma ainda estabelece regras para separação contábil desta atividade, evitando subsídios cruzados, o que contribui para uma competição justa neste mercado emergente.

2.8. Capacidade de acomodação

A capacidade de acomodação de veículos elétricos em redes de distribuição refere-se ao volume máximo de carga adicional que pode ser integrada ao sistema sem comprometer os padrões de qualidade, confiabilidade e segurança da energia elétrica. Esse conceito amplamente conhecido como *Hosting Capacity (HC)* é um parâmetro crítico para o planejamento e a operação das infraestruturas elétricas, especialmente diante do aumento na penetração de VEs e da geração distribuída.

De acordo com Bollen e Rönnberg (2017), a capacidade de acomodação reflete a flexibilidade operacional da rede para suportar novos consumos e produções sem exigir grandes investimentos em infraestrutura. Essa capacidade é influenciada por fatores como a localização dos eletropostos, o tipo de recarga utilizado e as características da rede elétrica local. Estudos recentes indicam que métodos de

simulações temporal são frequentemente empregados para avaliar o impacto da recarga de VEs e identificar os pontos críticos do sistema.

Do ponto de vista técnico, os principais desafios relacionados à capacidade de acomodação incluem sobrecarga em transformadores e alimentadores, desequilíbrios e quedas de tensão, além do agravamento das perdas técnicas. Por exemplo, carregadores rápidos, especialmente aqueles de alta potência, como os de 350 kW ou mais, podem causar sobrecargas significativas e ultrapassar os limites térmicos dos componentes da rede. Estudos, como os de Paudyal et al. (2021), enfatizam a importância de avaliar os impactos desses carregadores para determinar a capacidade máxima de cada nó da rede sem violar limites operacionais.

Além das questões técnicas, a capacidade de acomodação também possui dimensões econômicas e sociais. Economicamente, a integração de VEs pode representar tanto desafios quanto oportunidades. A aceitação de VEs depende da disponibilidade de uma infraestrutura de recarga eficiente e acessível, bem como dos benefícios ambientais, como a redução de emissões de carbono e a melhoria na qualidade do ar.

Estratégias para ampliar a capacidade de acomodação incluem a integração de fontes renováveis, o uso de armazenamento em baterias e implementação de tecnologias avançadas de gerenciamento de demanda. Essas soluções permitem distribuir melhor a carga na rede, otimizando os recursos existentes e evitando a necessidade de investimentos imediatos em expansão.

Pesquisas recentes, como as de Wang et al. (2019), exploram metodologias probabilísticas para identificar os limites de capacidade em diferentes configurações de redes, destacando a importância da localização dos carregadores na rede elétrica.

2.9. OpenDSS

O OpenDSS é um software utilizado para simular redes de distribuição de energia elétrica, sendo especialmente útil em redes inteligentes e sistemas que incorporam geração distribuída, como painéis solares ou turbinas eólicas. Ele é eficaz em simular a forma como a energia circula na rede, especialmente quando o fluxo de energia muda frequentemente devido a fontes renováveis.

De acordo com SEXAUER (2016), o OpenDSS possui duas versões principais: a primeira é um programa executável que pode ser usado de forma independente, com uma interface gráfica simples. Essa interface permite ao usuário desenhar os circuitos da rede, resolver problemas e visualizar os resultados. A segunda versão é um sistema baseado em servidor, chamado COM, que permite controlar o OpenDSS de outras plataformas de software, como Python ou MATLAB.

Com a versão COM, é possível criar programas adicionais para ampliar as funcionalidades do OpenDSS, usando linguagens de programação como Python, MATLAB e outras. Isso possibilita que o usuário faça simulações mais complexas e específicas para suas necessidades.

As extensões do OpenDSS são compostas por três partes principais:

- Electricdss-src: Contém o código fonte principal do OpenDSS, modificado para permitir a compatibilidade entre plataformas.
- DSS C-API: Uma interface simples que conecta o OpenDSS com outras plataformas, facilitando o uso do software.
- Extensão específicas de linguagem: São versões do OpenDSS adaptadas para linguagens de programação específicas, como Python, MATLAB e C#, permitindo que os usuários utilizem o OpenDSS de forma mais flexível.

2.10. Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD)

A Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD) desempenha um papel fundamental no Sistema de Informações Geográfico Regulatório (SIG-R) da distribuição de energia elétrica, conforme estabelecido pela ANEEL. Seu objetivo é fornecer uma visão precisa e simplificada do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), refletindo tanto a condição atual dos ativos quanto dados técnicos e comerciais relevantes. Para garantir a padronização e consistência das informações, as concessionárias de energia devem seguir os padrões e requisitos definidos no Módulo 10 do PRODIST, bem como as orientações do Manual de Instruções da BDGD (ANEEL, 2024).

Dentro da BDGD, as informações são divididas em diferentes entidades, que representam partes do sistema de distribuição de energia. Algumas dessas entidades

incluem as subestações (SUB), circuitos de alta e média tensão (CTAT, CTMT), e unidades transformadoras (EQTRMT), que são componentes essenciais da rede elétrica. Cada uma dessas entidades possui informações específicas, como a capacidade dos transformadores e as perdas de energia nos equipamentos.

Além disso, o Manual de Instruções da BDGD explica como gerar, validar e transmitir os dados de forma eficiente, garantindo que tudo esteja conforme as regras da ANEEL.

Após discutir os principais conceitos e estudos sobre mobilidade elétrica e seus impactos na rede elétrica, é necessário definir a abordagem adotada para este trabalho. No próximo capítulo, será apresentada a metodologia utilizada, detalhando os critérios de seleção da rede analisada, a modelagem computacional empregada e os procedimentos adotados para a otimização da alocação dos eletropostos.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho está estruturada de forma a atender aos objetivos propostos, combinando técnicas de coleta de dados, modelagem computacional e validação por meio de estudos de caso. A abordagem é dividida em etapas que incluem o levantamento de informações relevantes, a construção de modelos matemáticos e computacionais, e a aplicação de algoritmos de otimização para identificar a solução mais eficiente com base nos critérios adotados.

Inicialmente, é realizado a construção de uma curva de demanda representativa para o eletroposto de carga rápida, visando criar perfis que correspondam ao comportamento das estações de recarga de alta potência para VEs. Em seguida, esse eletroposto é incorporado à rede de distribuição, e um estudo de fluxo de potência é conduzido.

A primeira análise ocorre por meio de uma varredura completa em todos os nós, aplicando métodos de qualidade de energia para averiguar quais nós tiveram o menor impacto com a adição do eletroposto. A partir da primeira análise, os casos com o menor impacto foram submetidos a simulações de capacidade de acomodação para determinar a potência máxima que pode ser designado para o eletroposto.

O presente estudo foi desenvolvido para a cidade de Garanhuns, localizado no agreste meridional de Pernambuco, a aproximadamente 230 km da capital Recife. Com uma população estimada de 142.506 habitantes e área territorial de 458,96 km² (IBGE, 2023), a cidade se destaca como um importante polo regional concentrando atividades comerciais, educacionais e de serviços que atraem um fluxo significativo de pessoas das cidades circunvizinhas.

3.1. Caracterização da rede de distribuição

A rede de distribuição de energia elétrica da região de Garanhuns é composta por 11 alimentadores que operam em média tensão (13.8 kV), atendendo diferentes setores da cidade. Com base nos dados obtidos da BDGD a infraestrutura elétrica apresenta as seguintes características:

- Extensão total da rede: ~2257 km
- Número total de transformadores: ~3545
- Quantidade de unidades consumidoras (uc): ~85488

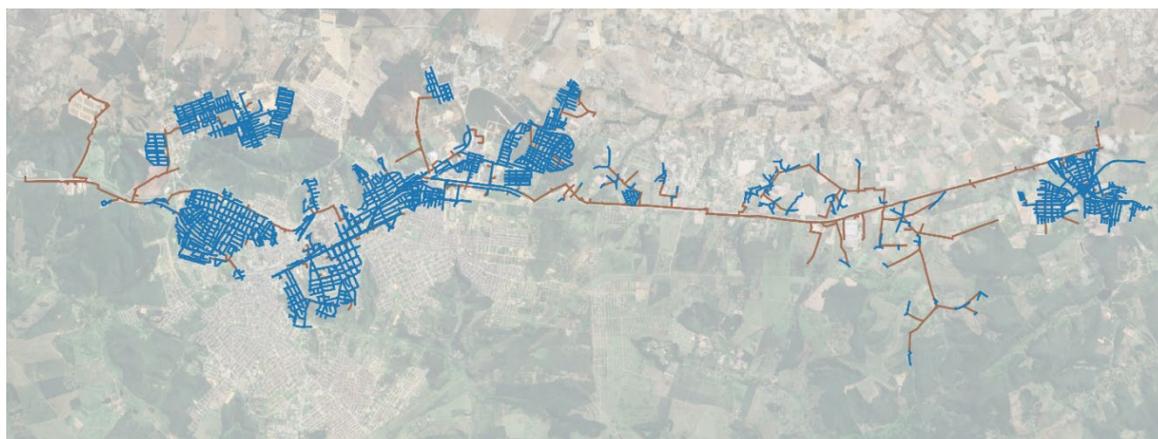
3.2. Seleção dos alimentadores

Para o estudo foram selecionados três alimentadores representativos da rede de distribuição, considerando os seguintes critérios:

1. Densidade de carga
 - Calculada pela relação entre número de consumidores e extensão do alimentador;
 - Prioridade de áreas com maior concentração de demanda;
 - Consideração do potencial de crescimento;
2. Proximidade com principais vias de tráfego
 - Análise do fluxo veicular diário
 - Conectividade com rodovias principais
 - Facilidade de acesso para usuários
3. Disponibilidade de infraestrutura para instalação de eletroposto
 - Capacidade das linhas existentes
 - Estado de conservação da rede
 - Possibilidade de expansão
4. Perfil de consumo diversificado (residencial, comercial e industrial)
 - Mix entre cargas residenciais, comerciais e industriais
 - Padrões de consumo ao longo do dia
 - Sazonalidade da demanda

Na figura 3 está apresentado uma visão das linhas de distribuição, assim como os alimentadores selecionados baseados nos critérios considerados.

Figura 3 – Visão das linhas de distribuição dos alimentadores selecionados.



Fonte: Autoria Própria.

3.3. Caracterização dos alimentadores selecionados

Alimentador 220: Atende predominantemente os bairros Magano e COHAB 3, além de uma parte do bairro São José. Sua infraestrutura é composta por uma rede trifásica que percorre vias de grande circulação, garantindo o fornecimento de energia para áreas residenciais, comerciais e alguns pontos industriais. Além disso, o alimentador é responsável por suprir estabelecimentos essenciais, como unidades de saúde e instituições de ensino da região. Na figura 4 estão expostas as linhas de distribuição do alimentador 220.

- Localização: Região de alto tráfego veicular com mix industrial e residência
- Extensão: 64,84 km
- Características principais:
 - i. 98 transformadores instalados
 - ii. 10898 uc
 - iii. Densidade de carga: 168,07 uc/km
 - iv. Principal área industrial da cidade
 - v. Proximidade com zona comercial

Figura 4 – Visão das linhas de distribuição do alimentador 220.



Fonte: Autoria Própria.

Alimentador 250: Está localizado inteiramente no bairro Heliópolis, cobrindo toda sua extensão. Esse alimentador atende uma área urbana densa, caracterizada por uma elevada demanda energética devido à presença de centros comerciais,

escolas, hospitais e áreas residenciais de médio e alto padrão. Na figura 5 estão expostas as linhas de distribuição do alimentador 250.

- Localizado: Uma das principais avenidas comerciais da cidade, Avenida Rui Barbosa.
- Extensão: 35,25 km
- Características principais:
 - i. 86 transformadores instalados
 - ii. Densidade de carga: 128,09 uc/km
 - iii. Centro comercial com alta concentração de estabelecimentos
 - iv. Área de grande circulação de veículos

Figura 5 – Visão das linhas de distribuição do alimentador 250.



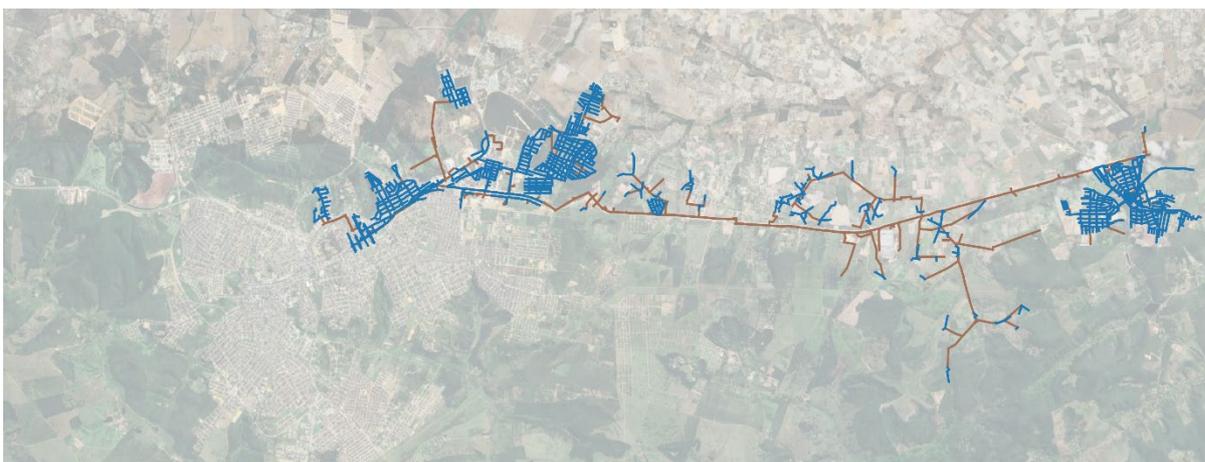
Fonte: Autoria Própria.

Alimentador 254: Possui uma área de abrangência mais extensa, incluindo o Novo Heliópolis, parte do bairro José Maria Dourado, uma região do Heliópolis e se estendendo até o município de São João. Esse alimentador desempenha um papel fundamental no atendimento a indústrias, comércios e residências ao longo de seu percurso, além de fornecer energia para propriedades rurais e pequenos polos produtivos no município vizinho. Na figura 6 estão expostas as linhas de distribuição do alimentador 254.

- Localização: Região de BR-232 e PE-177
- Extensão: 133,5 km
- Características principais:
 - i. 200 transformadores instalados

- ii. 8999 uc
- iii. Densidade de carga: 67,64 uc/km
- iv. Cobertura de importantes rotas de conexão intermunicipal
- v. Atendimento a áreas de expansão urbana
- vi. Proximidade com postos de combustíveis e serviços de apoio rodoviário

Figura 6 – Visão das linhas de distribuição do alimentador 254.



Fonte: Autoria Própria.

A análise comparativa dos três alimentadores revela características complementares que os tornam adequados para o estudo:

1. O Alimentador 220 apresenta a maior densidade de carga (168,08 consumidores/km) e atende uma região com forte presença industrial, o que sugere uma infraestrutura robusta capaz de suportar cargas de maior potência.

2. O Alimentador 250, embora tenha a menor extensão, está estrategicamente posicionado na principal área comercial, com alto fluxo de pessoas e veículos durante o horário comercial, características ideais para a instalação de eletropostos.

3. O Alimentador 254, apesar da menor densidade de carga, cobre importantes corredores rodoviários (BR-232 e PE-177), sendo crucial para atender a demanda de veículos em trânsito entre municípios.

Esta distribuição geográfica e características técnicas diversificadas permitem uma análise abrangente das diferentes condições de operação que um eletroposto pode enfrentar, contribuindo para uma avaliação mais completa e representativa do sistema de distribuição de Garanhuns.

3.4. Modelagem do sistema de distribuição

A primeira etapa para realização deste estudo foi a modelagem da rede elétrica de distribuição de Garanhuns. Este processo envolveu a coleta e organização de dados técnicos relacionados ao sistema elétrico, como:

- Topologia da Rede: Identificação da configuração da rede elétrica, incluindo quantidade de alimentadores, subestações, linhas e cargas.
- Parâmetros Elétricos: Levantamento de informações sobre capacidade dos transformadores e limites de tensão permitidos nas linhas.
- Dados de Carga: Análise de distribuição da carga na cidade.

Para realizar a modelagem foi utilizado uma ferramenta de conversão, que converte os dados da BDGD em um formato compatível com o OpenDSS. Essa ferramenta permite a conversão dos dados a partir do alimentador designado, garantindo uma integração eficiente e precisa das informações.

Esses dados convertidos foram inseridos no software de simulação OpenDSS, que permite a representação fiel do comportamento do sistema elétrico sob diferentes condições operacionais. O uso do software se justifica por sua capacidade de realizar simulações em tempo real e análise detalhadas, perfil de tensão e carregamento dos componentes da rede.

Foram considerados critérios regulatórios e técnicos estabelecidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), especialmente o módulo 8 relacionado à qualidade da energia. Para análise foram aplicados as Equações (1) e (2) de DRP e DRC que expressam em percentual o quanto do tempo de medição a carga permaneceu com tensão classificada como precária ou crítica.

Tensão Precária (DRP): $0,90 < V < 0,93$ pu

Tensão Crítica (DRC): $V < 0,90$ ou $V > 1,05$ pu

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100\% \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100\% \quad (2)$$

Os indicadores de qualidade do fornecimento de energia são definidos onde nlp corresponde ao maior valor entre as fases para leituras na faixa precária, enquanto nlc representa o maior valor entre as fases para leituras na faixa crítica (PRODIST, 2021).

Para viabilizar esse cálculo, os dados das curvas de demanda do sistema elétrico analisado foram ajustados por meio de interpolação, passando de 24 pontos (correspondente às 24 horas do dia) para 1008 pontos, permitindo assim a obtenção das medições. Esses cálculos garantem que a integração do eletroposto não comprometa os limites operacionais da rede, oferecendo maior confiabilidade às soluções propostas.

3.5. Definição da curva de demanda do eletroposto

A curva de demanda do eletroposto foi elaborada com o objetivo de refletir o comportamento real do consumo de energia elétrica associado à recarga de veículos elétricos em diferentes horários do dia. Para isso foram adotadas as seguintes etapas:

- a) Coleta de Dados: Foram analisados estudos existentes sobre o comportamento de recarga de VEs, considerando variáveis como horários de pico, duração típica de recargas e capacidades de baterias. Como referência inicial foi utilizado como exemplo a curva de demanda apresentada no trabalho de Celli et al. (2014).
- b) Adaptação com Modelagem Estocástica: A metodologia de Monte Carlo foi empregada para realizar adaptações na curva de demanda, permitindo a geração de cenários probabilísticos de consumo. Esse método é amplamente utilizado na literatura por sua capacidade de simular incertezas e variabilidades em sistemas complexos.

Este estudo fundamentou-se em pesquisas prévias de implementação de eletropostos que modelaram matematicamente os padrões de utilização, permitindo o desenvolvimento de um modelo computacional que simula a operação de estações de recarga veicular a partir de uma curva de demanda diária hipotética, representativa dos ciclos de uso esperados em condições reais. Para garantir a precisão do modelo, foram utilizados parâmetros criteriosamente selecionados que refletem condições típicas de operação de veículos elétricos em centros urbanos de médio porte.

Para obter um resultado prático foi considerado os parâmetros:

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para obtenção da curva de demanda.

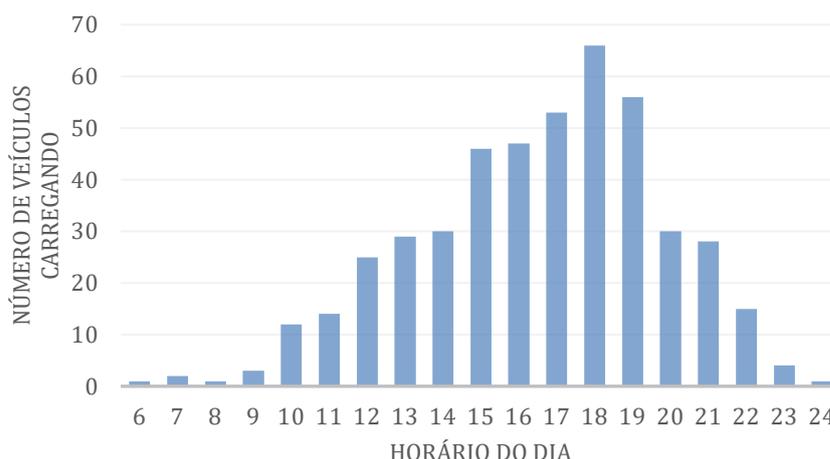
| Parâmetro | Valor |
|---|--|
| Número de Veículos Elétricos (VEs) | 1.000 |
| Consumo de Energia dos VEs | 0,2 kWh/km |
| Capacidade da Bateria dos VEs | 22 kWh |
| Potência de Recarga do Eletroposto | 50 kW |
| Nível de Tolerância de Carga da Bateria (Viagem de Ida) | 25% |
| Nível de Tolerância de Carga da Bateria (Viagem de Volta) | 50% |
| Fator de Esquecimento da Recarga Noturna | 10% dos VEs (distribuição normal, média de 60%, desvio padrão de 9%) |
| Distância Diária Percorrida | Média de 50 km, variância de 200 km ² |
| Velocidade Média Durante o Percurso | Média de 50 km/h, desvio padrão de 7 km/h (distribuição normal) |
| Horário da Viagem de Ida (Período Integral) | 9h00 (desvio padrão de 90 minutos) |
| Horário da Viagem de Ida (Meio Período) | 8h00 (desvio padrão de 60 minutos) |
| Horário da Viagem de Volta | Entre 17h00 e 18h30 |

Fonte: Adaptação de Martins.

Como resultado da aplicação dos critérios utilizados para determinação da curva de demanda do eletroposto, foi obtido o perfil de consumo ilustrado na figura 7. A análise desta curva revela aspectos fundamentais sobre o comportamento da demanda energética ao longo do dia, oferecendo insights valiosos para o dimensionamento adequado da infraestrutura.

A curva demonstra um pico de demanda principal, coincidente com os padrões de mobilidade urbana modelados. O pico, significativamente mais acentuado, manifesta-se entre 17h00 e 19h00, correspondendo ao retorno dos deslocamentos e refletindo a necessidade crítica de recarga para garantir autonomia suficiente para os trajetos subsequentes.

Figura 7 – Curva de demanda elaborada para o eletroposto proposto.



Fonte: Autoria Própria.

3.6. Desenvolvimento e aplicação do algoritmo de otimização

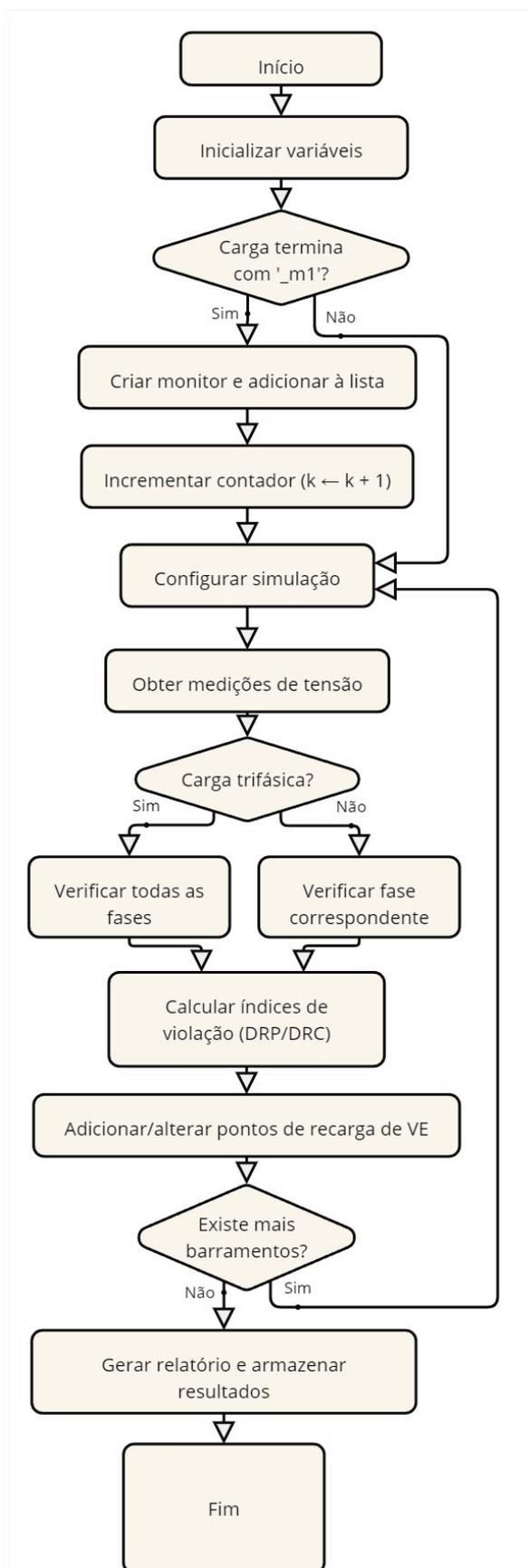
O desenvolvimento do algoritmo foi focado em rodar o fluxo de potência no OpenDSS, ao mesmo tempo em que foram alocados monitores para obter a tensão e corrente em cada carga conectada a cada nó. A alocação do eletroposto é realizada através de um processo iterativo. O conjunto do eletroposto é movido sequencialmente para diferentes barramentos da rede, permitindo avaliar o impacto em cada localização possível. Para cada posição do eletroposto, são calculados os índices DRP e DRC a partir dos dados coletados dos monitores.

A partir das análises dos dados obtidos na simulação foram identificadas possíveis localizações a partir dos alimentadores analisados para alocar o eletroposto. Com base nessas localizações, novas simulações foram realizadas para avaliar a capacidade de acomodação dos eletropostos nesses pontos específicos. Durante essas simulações foi testada uma potência inicial para o eletroposto para identificar a localização que apresentasse o menor impacto na rede e ao mesmo tempo permitisse a alocação da maior potência possível.

Tendo como o objetivo analisar o impacto da alocação do eletroposto e verificar as possíveis violações do DRP e DRC, por meio do Algoritmo 1, conforme ilustrado na figura 8.

O pseudocódigo do Algoritmo 1, com mais detalhes da construção, pode ser consultado no APÊNDICE A.

Figura 8 – Fluxograma do Algoritmo 1.



Fonte: Autoria Própria.

3.7. Capacidade da acomodação

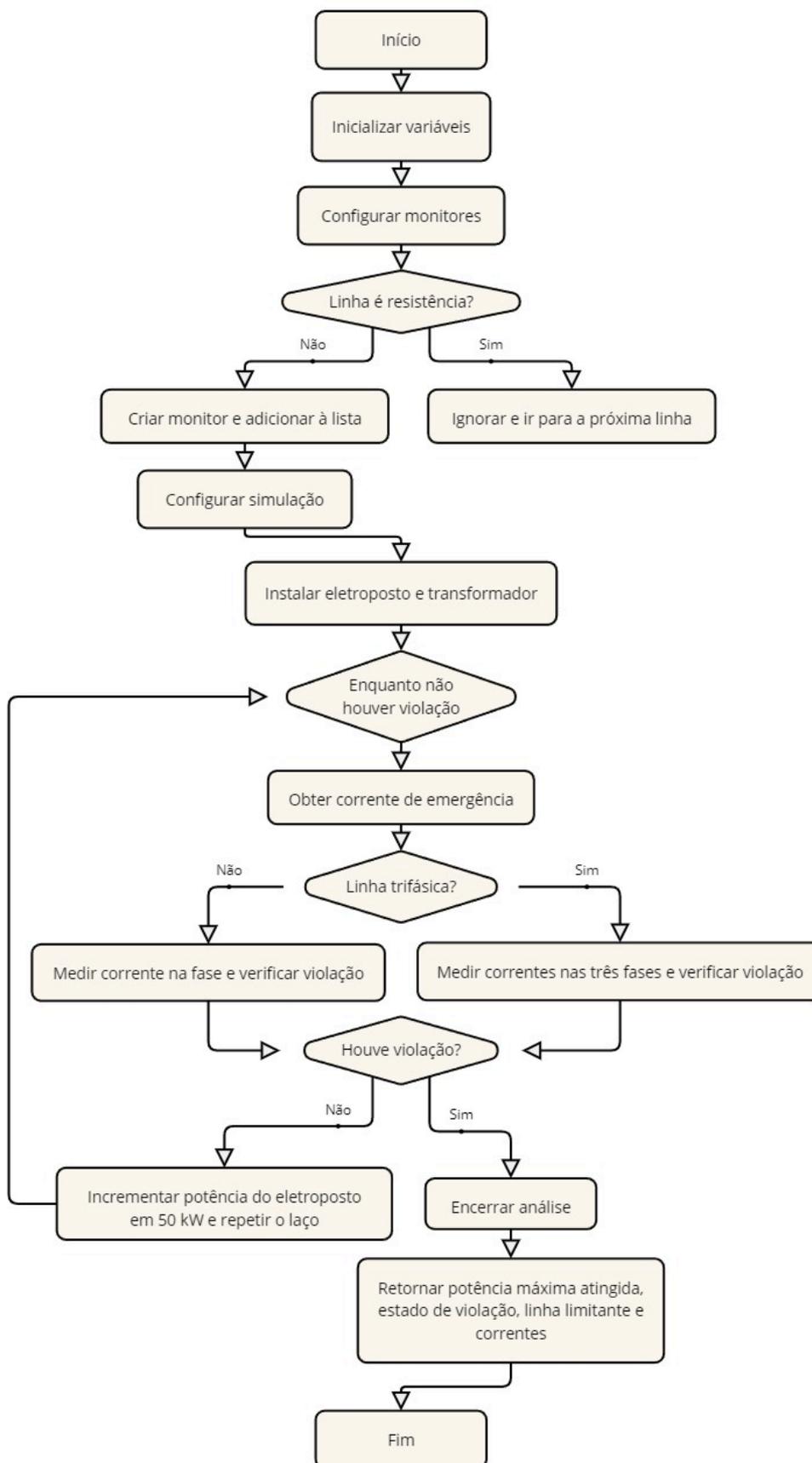
A capacidade de acomodação é relacionada pelo número máximo de eletropostos ou a máxima potência que um eletroposto pode ser integrado à rede de distribuição sem comprometer a qualidade da energia fornecida. O processo utiliza uma abordagem iterativa que incrementa gradualmente a potência do eletroposto até identificar o limite máximo de carregamento suportado pela rede.

O processo de monitoramento é implementado através dos monitores instalados em todas as linhas. Esses monitores são configurados para realizar medições fasoriais de corrente, com tratamento diferenciado para linhas trifásicas e monofásicas. Nas linhas trifásicas, são monitoradas as correntes nas três fases simultaneamente, enquanto nas linhas monofásicas, apenas a corrente da fase verificada.

A determinação da capacidade de acomodação segue um processo iterativo onde, a partir da potência inicial de 50 kW, são aplicados incrementos sucessivos de 50 kW. Essa escolha de potência inicial segue a ABNT (2021), considerando que 50 kW é a potência mínima para um conector de recarga rápida. Além disso, foi adotado um acréscimo de 50 kW, pois esse valor é um divisor comum entre a potência mínima e máxima permitida para o nível 3 (recarga rápida). Em cada iteração, é executado um fluxo de potência e são verificadas as correntes em todas as linhas monitoradas, comparando-as com os limites de emergência específicos de cada condutor.

O processo iterativo continua até que seja detectada uma violação do limite de corrente em qualquer condutor da rede. No momento da violação, o algoritmo registra a última potência válida como sendo a capacidade de acomodação para o ponto analisado, identifica o trecho limitante da rede e armazena os valores das correntes nas fases no ponto de violação. Esta abordagem permite determinar de forma precisa a máxima capacidade que pode ser instalada em um determinado ponto da rede, considerando as limitações térmicas de todos os condutores afetados pela inserção do eletroposto. O Algoritmo 2 foi desenvolvido para obter a máxima capacidade de acomodação para alocação do eletroposto, a construção segue como ilustrado na figura 9.

Figura 9 – Fluxograma do Algoritmo 2.



Fonte: Autoria Própria.

O pseudocódigo do Algoritmo 2, com mais detalhes da construção, pode ser consultado no APÊNDICE B.

3.8. Critérios de avaliação dos resultados

A avaliação dos resultados obtidos nas simulações foi estruturada em duas etapas principais: primeiramente, a análise dos índices de qualidade de tensão (DRC e DRP) para seleção dos pontos candidatos, e, posteriormente, a determinação da capacidade máxima de acomodação nestes pontos selecionados.

Na primeira etapa, a análise dos índices DRC e DRP foi realizada através do cálculo do erro relativo, utilizando como referência o caso base do sistema, ou seja, a condição da rede sem a inserção do eletroposto. Este erro relativo foi calculado para cada possível ponto de alocação do eletroposto e para todas as cargas conectadas, permitindo uma avaliação sistemática do impacto da instalação nos níveis de tensão do sistema.

A metodologia de avaliação dos erros relativos considerou três categorias distintas de resultados:

1. Erros negativos: indicando uma melhoria nos índices DRC e DRP em relação ao caso base, o que representa um impacto positivo na qualidade de tensão do sistema
2. Erros positivos: sinalizando uma deterioração dos índices, representando um impacto negativo na rede
3. Erros nulos: indicando que não houve alteração significativa nos índices após a inserção do eletroposto

O peso atribuído a cada resultado do cálculo do erro relativo foi definido da seguinte forma: erro negativo recebe peso 2, erro positivo recebe peso -1 e erro nulo recebe peso 1.

Esta categorização permitiu identificar, para cada um dos três alimentadores analisados, o ponto de conexão que apresentou a maior quantidade de erros nulos ou, preferencialmente, maior número de erros negativos indicando uma melhoria nos índices de qualidade de tensão. Como resultado desta primeira etapa, foram selecionados três pontos candidatos, um em cada alimentador, para uma análise mais aprofundada.

Na segunda etapa, os três pontos selecionados foram submetidos a uma análise de capacidade de acomodação. Esta análise consistiu na aplicação de incrementos graduais na potência do eletroposto, partindo de um valor inicial e aumentando progressivamente até identificar o limite máximo suportado pelo sistema. O critério principal para determinação deste limite foi a ocorrência de sobrecarga em qualquer condutor da rede.

O processo de avaliação da capacidade de acomodação considerou:

- A máxima potência atingida antes da primeira violação dos limites
- A identificação do elemento limitante da rede
- O comportamento das correntes nas diferentes fases do sistema

A comparação das capacidades máximas obtidas nos três pontos candidatos, em conjunto com a análise prévia dos índices de qualidade de tensão, permitiu identificar a localização mais adequada para a instalação do eletroposto. O ponto selecionado como ótimo foi aquele que, além de apresentar impactos favoráveis nos índices DRC e DRP, demonstrou a maior capacidade de acomodação de potência sem comprometer os limites operacionais do sistema.

Esta metodologia de avaliação em duas etapas se mostrou eficaz por considerar tanto os aspectos de qualidade de tensão quanto as limitações térmicas da rede, proporcionando uma análise abrangente e tecnicamente fundamentada para a tomada de decisão quanto à localização ideal do eletroposto. A consideração simultânea destes critérios garante que a solução escolhida seja não apenas viável do ponto de vista da capacidade do sistema, mas também benéfica para a qualidade do fornecimento de energia a todos os consumidores conectados à rede.

Com a metodologia definida e os procedimentos de análise estabelecidos, o próximo passo é avaliar os resultados obtidos a partir das simulações realizadas. No próximo capítulo, serão apresentados e discutidos os impactos da inserção dos eletropostos na rede de distribuição, analisando critérios como qualidade da energia, capacidade de acomodação e viabilidade das localizações propostas.

3.9. Ambiente computacional

Para a execução das simulações descritas neste trabalho, foi utilizado a seguinte configuração de hardware e software:

- Processador: Ryzen 5 3400G
- Memória RAM: 16 GB
- Armazenamento: 1 TB
- Placa de vídeo: RTX 2060 SUPER
- Sistema Operacional: Windows 11 Pro

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir das simulações realizadas. A análise é estruturada em três etapas principais: avaliação dos índices de qualidade de tensão (DRP e DRC), determinação da capacidade de acomodação e análise comparativa das localizações propostas para a instalação do eletroposto.

4.1. Avaliação dos índices de qualidade de tensão

A qualidade da tensão é um fator determinante na alocação de eletropostos, pois influencia diretamente a estabilidade da rede elétrica. Os índices analisados foram o DRP e DRC. Para avaliar o impacto da inserção do eletroposto, foi comparado os valores desses índices antes e depois da instalação do eletroposto.

Cada local de instalação foi avaliado considerando a variação nos índices de qualidade da tensão. O impacto foi classificado em três categorias:

- Impacto positivo: quando a inserção do eletroposto melhorou a qualidade da tensão.
- Impacto neutro: quando a inserção do eletroposto não alterou significativamente os índices.
- Impacto negativo: quando a inserção do eletroposto degradou a qualidade da tensão.

Para facilitar a interpretação, cada teste foi identificado com um código representando o cenário analisado, como "10063783M-220", "1685766M-250" ou "10112979M-254", que correspondem aos pontos de conexão no sistema de distribuição modelado no OpenDSS. Esses códigos indicam a posição específica na rede onde o eletroposto foi inserido para avaliação dos impactos na qualidade de tensão.

Além disso, foi feita uma análise quantitativa do impacto, contabilizando quantos pontos apresentaram melhoria, piora ou permaneceram inalterados. No entanto, apenas a contagem desses valores pode não ser suficiente para determinar a melhor escolha. Por isso, o peso de cada erro foi considerado, atribuindo maior

influência a erros negativos, seguido pelos nulos e, por último, os positivos. O valor final foi obtido ponderando a quantidade de erros e sua intensidade.

A interpretação dos resultados mostrou que algumas localizações apresentaram impacto mais negativo que outras, tornando-se inviáveis para a implantação do eletroposto. Outras apresentaram impacto neutro ou positivo, sendo recomendadas para a instalação.

Como critério de seleção dos locais para alocação, foi estabelecido que o melhor ponto deveria atender três condições:

$$E_{N_DRP} \text{ e } E_{N_DRC} > E_{N_DRP,base} \text{ e } E_{N_DRC,base} \quad (3)$$

$$E_{P_DRP} \text{ e } E_{P_DRC} < E_{P_DRP,base} \text{ e } E_{P_DRC,base} \quad (4)$$

$$E_{0_DRP} \text{ e } E_{0_DRC} > \text{ou} = E_{0_DRP,base} \text{ e } E_{0_DRC,base} \quad (5)$$

E_{N_DRP} e E_{N_DRC} = número de erros negativos de DRP e DRC no possível ponto.

E_{P_DRP} e E_{P_DRC} = número de erros positivos de DRP e DRC no possível ponto.

E_{0_DRP} e E_{0_DRC} = número de erros nulos de DRP e DRC no possível ponto.

$E_{N_DRP,base}$, $E_{N_DRC,base}$, $E_{P_DRP,base}$, $E_{P_DRC,base}$, $E_{0_DRP,base}$ e $E_{0_DRC,base}$ = valores correspondentes no caso base.

Em cada alimentador, apenas uma localização atendeu aos três critérios estabelecidos. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os dados comparativos, mostrando as quantidades de erros relativos negativos, positivos e nulos de DRP e DRC, tanto para o caso base quanto para a melhor localização identificada em cada alimentador.

Tabela 3 – Erro relativo dos índices DRP e DRC do alimentador 220.

| Quantidade de erros | Caso base | | 10063783M-220 | |
|---------------------|-----------|------|---------------|-------|
| | DRP | DRC | DRP | DRC |
| Negativos | 0 | 0 | 832 | 0 |
| Positivos | 4636 | 2981 | 1550 | 1129 |
| Nulos | 6808 | 8463 | 9062 | 10315 |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Erro relativo dos índices DRP e DRC do alimentador 250.

| | Caso base | | 1685766M-250 | |
|---------------------|------------------|------------|---------------------|------------|
| | DRP | DRC | DRP | DRC |
| Quantidade de erros | | | | |
| Negativos | 0 | 0 | 12 | 0 |
| Positivos | 2052 | 1125 | 25 | 11 |
| Nulos | 2823 | 3750 | 4838 | 4864 |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 – Erro relativo dos índices DRP e DRC do alimentador 254.

| | Caso base | | 10112979M-254 | |
|---------------------|------------------|------------|----------------------|------------|
| | DRP | DRC | DRP | DRC |
| Quantidade de erros | | | | |
| Negativos | 0 | 0 | 38 | 0 |
| Positivos | 4116 | 4527 | 100 | 38 |
| Nulos | 5713 | 5302 | 9691 | 9791 |

Fonte: Autoria Própria.

4.2. Determinação da capacidade de acomodação

Esta etapa envolveu a determinação da capacidade máxima de acomodação do eletroposto em cada alimentador, respeitando os limites da rede. Na Tabela 6 pode ser visualizado a linha que limitou o aumento da potência do eletroposto como também a potência que causou a interrupção. A análise revelou os seguintes valores:

Tabela 6 – Resultados da capacidade de acomodação.

| Alimentador | Linha limitante | Potência Máxima (kW) |
|--------------------|------------------------|-----------------------------|
| 220 | SMT_10108901 | 4850 |
| 250 | RBT_3005741887 | 306200 |
| 254 | RBT_3005822154 | 663000 |

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados mostram que o alimentador 254 possui a maior capacidade de acomodação, sendo uma opção estratégica para instalação de eletropostos de maior porte. Na Tabela 7 é possível visualizar as coordenadas e endereço, obtidas para as possíveis localizações do eletroposto.

Tabela 7 – Possíveis localizações do eletroposto.

| Alimentadores | Coordenadas | | Endereço |
|---------------|-------------|-------------|--|
| | Latitude | Longitude | |
| 220 | -8,863611° | -36,501158° | R. Monsenhor Tarciso Falcão - Dom Hélder Câmara |
| 250 | -8,877778° | -36,470909° | 2a Travessa Padre Agobar Valença - Heliópolis |
| 254 | -8,870737° | -36,449757° | Novo Heliópolis (sem nome de rua) |

Fonte: Autoria Própria.

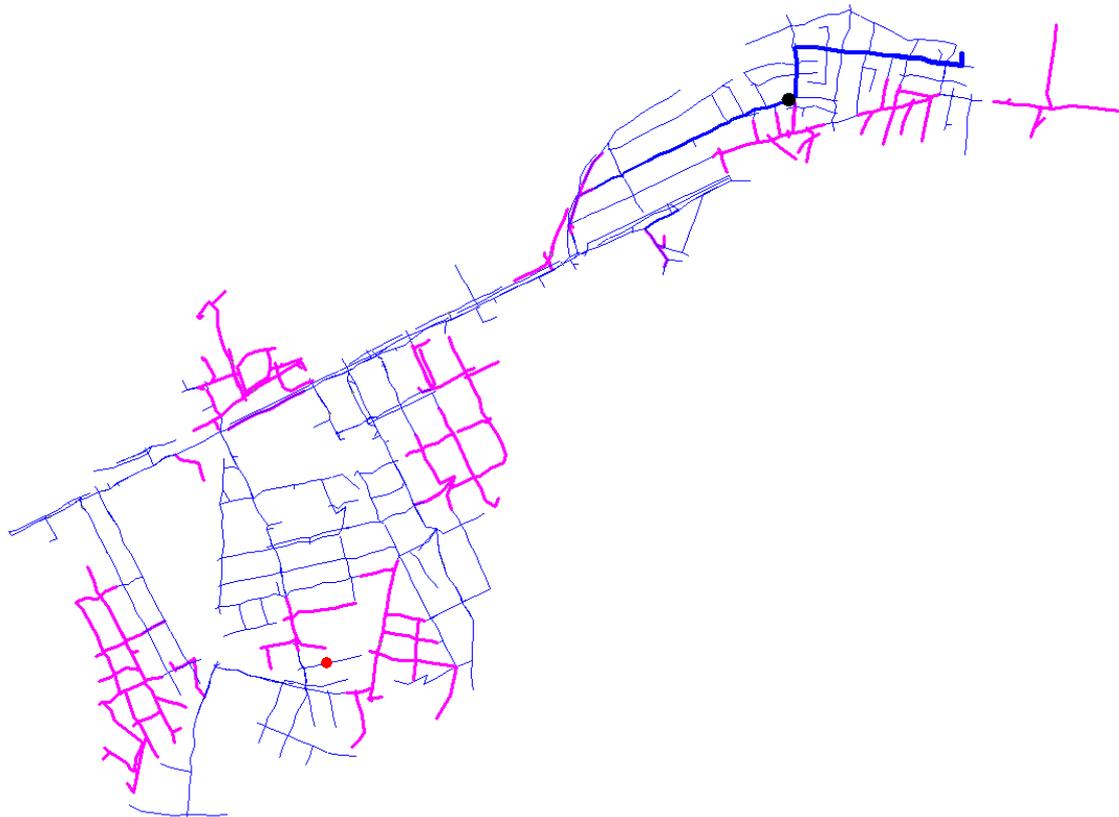
Nas figuras 10, 11 e 12 a seguir podem ser visualizados a localização do eletroposto (ponto preto) e a localização da respectiva limitação (ponto vermelho), de cada alimentador no OpenDSS.

Figura 10 – Localização eletroposto e falha no alimentador 220.



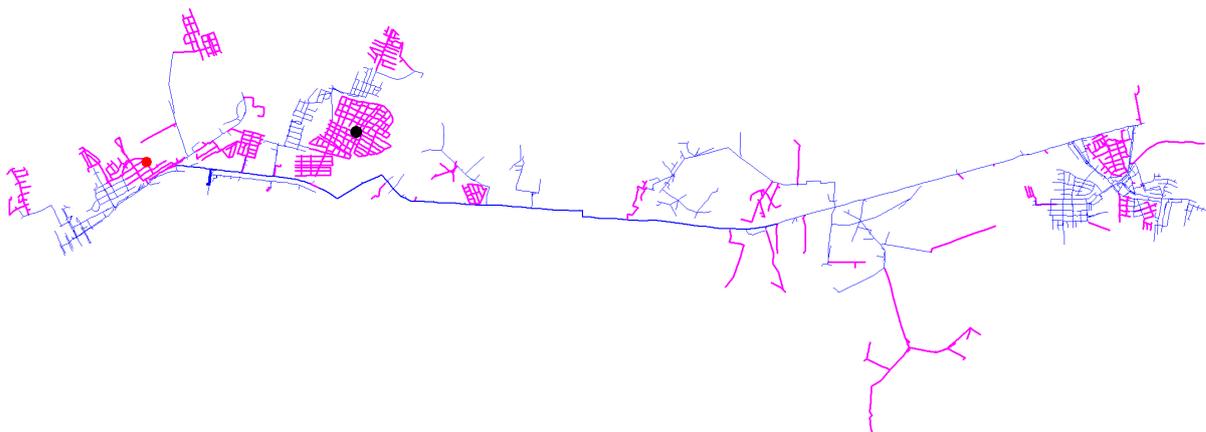
Fonte: Autoria Própria.

Figura 11 – Localização eletroposto e falha no alimentador 250.



Fonte: Autoria Própria.

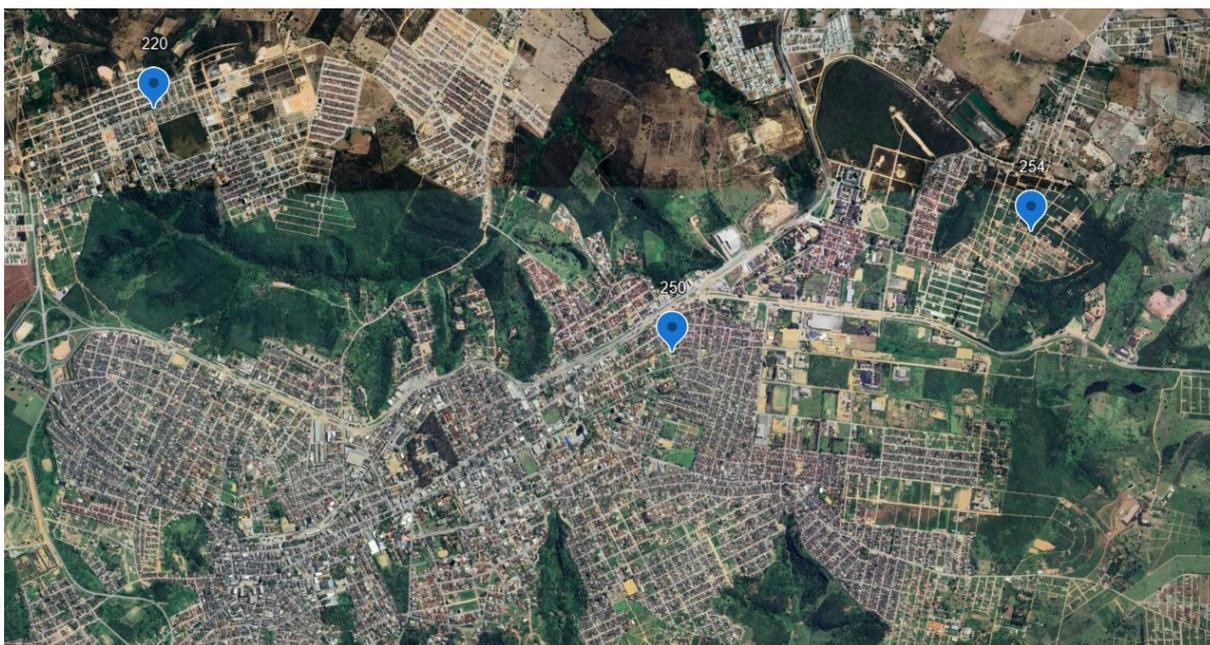
Figura 12 – Localização eletroposto e falha no alimentador 254.



Fonte: Autoria Própria.

Na figura 13 é possível ter uma visão das possíveis localizações do eletroposto para cada alimentador.

Figura 13 – Localizações propostas dos eletropostos em cada alimentador.



Fonte: Adaptado de Google Earth.

4.3. Análise da capacidade de acomodação

Os resultados das simulações indicam que o Alimentador 254 apresenta a maior capacidade de acomodação, sendo o mais adequado para suportar um eletroposto de carga rápida com menor impacto na rede elétrica. Sua infraestrutura permite uma maior absorção de carga sem comprometer a estabilidade do sistema, tornando uma escolha estratégica para a instalação.

A localização analisada no Alimentador 220 apresenta desafios significativos. Situado em um bairro afastado do fluxo principal de veículos, sua viabilidade para a instalação de um eletroposto é reduzida, uma vez que a demanda por carregamento seria menor. Além disso, a necessidade de infraestrutura adicional para viabilizar a conexão do eletroposto à rede elétrica local aumentaria os custos do projeto. Dessa forma, essa opção se torna menos prioritária em comparação com as demais.

Por outro lado, o Alimentador 250 se destaca por estar estrategicamente posicionado próximo a vias de alto tráfego e em uma região com grande concentração de postos de abastecimento convencionais. Esse fator torna essa localização altamente favorável para a implementação de um eletroposto, aproveitando a infraestrutura existente e facilitando a transição para a mobilidade elétrica. Além disso, a proximidade com corredores logísticos e centros comerciais amplia a demanda

potencial pelo eletroposto, garantindo um fluxo constante de usuários e maximizando a utilização da estrutura.

Dessa forma, a análise comparativa entre os três alimentadores sugere que o Alimentador 254 é a opção mais robusta em termos de capacidade elétrica, enquanto o Alimentador 250 representa a melhor escolha estratégica considerando o fluxo de veículos e a infraestrutura existente. Já o Alimentador 220, devido à sua localização menos favorável, deve ser considerado apenas em um cenário de futura expansão.

4.4. Tempo de simulações

O processamento dos dados e execução das simulações demandou tempos significativos em diferentes etapas do trabalho:

- **Conversão de dados:** A transformação dos dados da BDGD para o formato OpenDSS requereu, em média, uma semana por alimentador.
- **Algoritmo 1:** A execução do primeiro algoritmo demandou aproximadamente 10 horas por alimentador.
- **Algoritmo 2:** O segundo algoritmo apresentou melhor desempenho computacional, com tempo médio de execução de 1 hora por alimentador.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para otimização da alocação e dimensionamento de eletropostos de carga rápida na rede de distribuição de energia elétrica de Garanhuns, considerando aspectos técnicos e econômicos do sistema. A análise integrada dos múltiplos critérios permitiu identificar as localizações mais adequadas e as capacidades ótimas de carregamento, equilibrando as necessidades dos usuários de veículos elétricos com as limitações da infraestrutura existente.

Os objetivos propostos inicialmente foram plenamente alcançados através do desenvolvimento de um modelo computacional robusto, que possibilitou otimizar simultaneamente a localização dos eletropostos na rede elétrica e seu dimensionamento. A metodologia demonstrou ser eficaz na minimização dos impactos na rede de distribuição, ao mesmo tempo em que maximiza a acessibilidade aos usuários de veículos elétricos, considerando aspectos como fluxo de veículos, proximidade a centros comerciais e disponibilidade de infraestrutura elétrica.

A abordagem desenvolvida se mostrou particularmente relevante por considerar as características específicas da cidade de Garanhuns, incluindo sua topografia, distribuição populacional e perfil de consumo energético. O modelo computacional implementado permitiu uma incorporação de fatores como confiabilidade do sistema e qualidade do fornecimento de energia.

Um aspecto fundamental do trabalho foi a capacidade de equilibrar os interesses de diferentes stakeholders: consumidores de veículos elétricos, que necessitam de pontos de recarga acessíveis e eficientes; concessionárias de energia, preocupadas com a estabilidade e eficiência da rede; e gestores públicos, interessados no desenvolvimento sustentável da infraestrutura urbana.

Uma das principais contribuições deste trabalho é sua replicabilidade. Embora desenvolvida especificamente para Garanhuns, a metodologia pode ser adaptada para outras cidades de porte similar. Além disso, os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos importantes para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à promoção da mobilidade elétrica.

Para futuros desenvolvimentos nesta linha de pesquisa, sugere-se a incorporação de análises dinâmicas que considerem diferentes cenários de crescimento da frota de veículos elétricos, bem como a integração com fontes renováveis distribuídas, assim como uma análise de viabilidade financeira e de

distribuição da carga do eletroposto ao longo dos alimentadores. Recomenda-se também dimensionar considerando o padrão típico de tamanho dos eletropostos (2 a 8 estações de recarga) e avaliar os limites operacionais dos transformadores da rede para garantir a viabilidade técnica das instalações. Além disso, seria valioso explorar estratégias avançadas de gerenciamento da demanda dos eletropostos e realizar estudos comparativos com outras cidades da região, visando estabelecer um planejamento integrado da infraestrutura de recarga.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR IEC 61851-1**: Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos: Parte 1 - Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Base de Dados Geográfica da Distribuidora** : BDGD : Dados Abertos. 2022. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/base-de-dados-geografica-da-distribuidora-bdgd>. Acesso em: 09 dez. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas nº 414/2010, nº 470/2011, nº 901/2020 e outras. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO – ABVE. **Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024** : **ABVE**. Disponível em: <<https://abve.org.br/eletrificados-superam-previsoes-passam-de-170-mil-e-batem-todos-os-recordes-em-2024/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO – ABVE. **Mercado de veículos elétricos plug-in cresce 200% nos últimos 12 meses**. Disponível em: <https://abve.org.br/mercado-de-veiculos-eletricos-plug-in-cresce-200-nos-ultimos-12-meses/>. Acesso em: 29 out. 2024.

BOLLEN, M. H. J.; RÖNNBERG, S. K. Hosting capacity of the power grid for renewable electricity production and new large consumption equipment. *Energies*, **MDPI**, v. 10, n. 9, p. 1325, 2017.

CAETANO. **Carregadores para veículos elétricos**. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/32110/1/CarregadoresVeiculosEletricos.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.

COSTA, P. R. **Análise da Capacidade de Acomodação de Eletropostos de Carga Rápida para Veículos Elétricos**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2024.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Pernambuco, o estado dos elétricos**. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/colunas/diarioeconomico/2024/05/pernambuco-o-estado-dos-eletricos.html>. Acesso em: 23 mar. 2025.

EPE. **Demanda de energia dos veículos leves**. Empresa de Pesquisa Energética, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/demanda-de-energia-dos-veiculos-leves>. Acesso em: 13 dez. 2024.

GOMES, A. F. **Internet of energy**: “uma gestão inteligente, eficiente e sustentável do sistema elétrico de potência via internet”. Unilab.edu.br, 2023. Acesso em: 02 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **By 2030, EVs represent more than 60% of vehicles sold globally and require an adequate surge in chargers installed in buildings**. 2022. Disponível em: <https://www-iea-org.translate.goog/reports/by-2030-evs-represent-more-than-60-of-vehicles-sold-globally-and-require-an-adequate-surge-in-chargers-installed-in-buildings? x tr sl=en& x tr tl=pt& x tr hl=pt& x tr pto=wa>. Acesso em: 15 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2023 – Analysis**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 11 fev. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/garanhuns.html>. Acesso em : 03 jan. 2025.

IPCC. **Relatório IPCC 2023**. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 27 jan. 2025.

LUGENERGY. **Tipos de carregamento para veículos elétricos (4 Modos)**. Disponível em: <https://www.lugenergy.pt/tipos-de-carregamento-4modos>. Acesso em: 18 jan. 2025.

MARTINS, Marcelo Cardoso Sales. **Análise série temporal para alocação ótima de eletropostos de recarga rápida em áreas urbanas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2017.

MURATORI, M.; ELGQVIST, E.; CUTLER, D.; EICHMAN, J.; SALISBURY, S.; FULLER, Z.; SMART, J. Technology solutions to mitigate electricity cost for electric vehicle DC fast charging. *Applied Energy*, v. 242, p. 415-423, maio 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.061>. Acesso em: 1 dez. 2024.

NEOCHARGE. **Tudo sobre carregador de carro elétrico**. Disponível em: <https://www.nocharge.com.br/tudo-sobre/carregador-carro-eletrico/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

RADATZ, P.; CONTRIBUTORS. **bdgd2opendss**: Uma ferramenta de conversão de BDGD para OpenDSS (versão 1.0.0) [Software de computador]. GitHub, 2024. Disponível em: <https://github.com/pauloradatz/bdgd2opendss>.

RICHARDSON, D. B. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 19, n. C, p. 247-254, 2013. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v19y2013icp247-254.html>.

SEXAUER, J. **Introdução ao OpenDSS**. Tradução de PAULO RADAZ e CELSO ROCHA. USA: Electric Power Research Institute – EPRI, 2016.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Análise de Níveis de Tensão

Algoritmo 1: Cálculo dos Índices DRP e DRC

Entrada:

- Arquivo de configuração da rede (arquivo DSS)
- Pontos de monitoramento de carga
- Limites de tensão (V_{min} , V_{max})
- Parâmetros de simulação (modo diário, 1008 pontos, passo de 1,43m)

Saída:

- DRP (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária) para cada ponto monitorado
- DRC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica) para cada ponto monitorado

1. Inicializar:

- Listas vazias para índices DRP e DRC
- Lista vazia para pontos de monitoramento de carga
- Contador de monitores $k \leftarrow 0$

2. Criar monitores para cada ponto de carga:

- Para cada carga i na rede:
 - Se nome_carga termina com "_m1":
 - Criar novo monitor m_{k+1} para carga i
 - Adicionar carga à lista de monitoramento
 - $k \leftarrow k + 1$

3. Configurar parâmetros de simulação:

- Definir modo = diário
- Definir número de pontos = 1008
- Definir tamanho do passo = 1,43m

4. Para cada ponto de carga monitorado:

- Obter medições de tensão do monitor
- Se a carga for trifásica:
 - Verificar todas as três fases
- Se a carga for monofásica:
 - Verificar a fase

5. Calcular índices de violação:

- Contar valores precários onde $0,90 \leq V \leq 0,93$
- Contar valores críticos onde $V < 0,90$ OU $V > 1,05$
- $DRP = (\text{contagem_precaria} / 1008) * 100$
- $DRC = (\text{contagem_critica} / 1008) * 100$

6. Para cada barramento na rede:

- Criar conexão do transformador
- Adicionar carga do ponto de recarga de VE
- Repetir passos 3-5
- Armazenar resultados

7. Resultados de saída:

- Criar relatório com valores de DRP e DRC
- Armazenar valores em planilha por barramento e ponto de carga

APÊNCICE B – Capacidade de acomodação

Algoritmo 2: Análise do Limite de Carregamento para Alocação de Eletroposto

Entrada:

- Arquivo de rede elétrica (DSS)
- Características do eletroposto (potência inicial, FP, tensão)
- Parâmetros de simulação (modo diário, 1008 pontos)

Saída:

- Potência máxima admissível do eletroposto
- Identificação do trecho limitante
- Correntes nas fases do trecho limitante

1. Inicializar:

- Lista vazia para elementos monitorados
- Potência inicial do eletroposto $\leftarrow 0$
- Passo de incremento $\leftarrow 50$ kW

2. Configurar monitores:

- Para cada linha i da rede:
 - Se não for resistência:
 - Criar monitor $ai+1$ para linha i
 - Adicionar linha à lista de monitoramento

3. Configurar simulação:

- Definir modo = diário
- Definir número de pontos = 1008
- Definir passo de tempo = 1,43m

4. Instalar eletroposto:

- Criar transformador (13,8/0,38 kV, 10 MVA)
- Conectar eletroposto (50 kW inicial, FP = 0,92)

5. Enquanto não houver violação:

- Para cada linha monitorada i:
 - Obter corrente de emergência da linha
 - Se linha for trifásica:
 - Medir correntes nas três fases
 - Verificar violação em qualquer fase
 - Senão:
 - Medir corrente na fase
 - Verificar violação
 - Se houver violação:
 - Encerrar análise
 - Senão:
 - Incrementar potência do eletroposto em 50 kW