



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

MATHEUS DA COSTA SOARES

**IMPACTOS OCASIONADOS POR VEÍCULOS ELÉTRICOS EM UMA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO**

BELÉM-PA
2025

MATHEUS DA COSTA SOARES

**IMPACTOS OCASIONADOS POR VEÍCULOS ELÉTRICOS EM UMA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Orientadora: Dra. Carolina de Mattos Affonso

BELÉM-PA
2025

MATHEUS DA COSTA SOARES

**IMPACTOS OCACIONADOS POR VEÍCULOS ELÉTRICOS EM UMA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO**

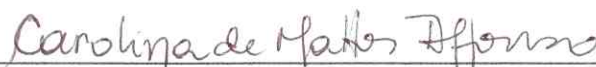
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como
requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Orientadora: Dra. Carolina de Mattos Affonso

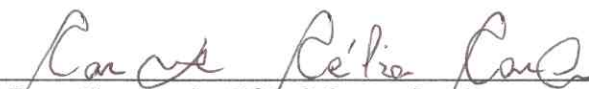
Data de Aprovação: 03/04/2025

Conceito: EXCELENTE

Banca Examinadora:



Prof. Dra. Carolina de Mattos Affonso
(Orientadora – UFPA)



Prof. Dra. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
(Avaliadora Interna – UFPA)



Prof. Rodrigo Veiga da Silva
(Avaliador Externo – UFPA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir trilhar esse caminho e por me sustentar nos momentos mais difíceis ao longo desses anos. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, Marco e Sandra, sou eternamente grato. Vocês me criaram com tanto amor e paciência, sempre me mostrando o caminho certo. Mesmo diante das dificuldades, nunca deixaram de acreditar em mim e de me incentivar a estudar. Tudo o que conquistei até aqui tem muito de vocês.

Minha esposa, Aksa, meu porto seguro. Quantas vezes pensei em desistir, e lá estava você, com palavras de apoio e carinho, me lembrando que eu era capaz? Sua paciência, compreensão e força foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Obrigado por estar sempre ao meu lado.

À minha irmã Elisa, ao meu cunhado Hugo, ao meu irmão Gabriel e à minha cunhada Sarah, obrigado por todo o apoio e pelas orações que, tenho certeza, foram fundamentais para que eu conquistasse essa vitória. Saber que vocês torciam por mim me deu ainda mais forças para continuar.

À minha avó Nazaré e à minha tia Vera Lúcia, que hoje descansa em paz, minha eterna gratidão. Desde pequeno, vocês me incentivaram ao conhecimento, me presenteando com livros e despertando em mim o gosto pelos estudos. Esse sonho também é de vocês.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, sou muito grato. Foram muitas horas de estudo, dúvidas compartilhadas e desafios superados juntos. Obrigado por cada conversa, cada explicação e cada momento de aprendizado.

Por fim, agradeço à minha orientadora, Prof. Dra. Carolina, e aos colegas Sofia, Vivian e Hugo. Cada um de vocês contribuiu de alguma forma para que este trabalho fosse possível. Obrigado por toda a ajuda, paciência e incentivo.

RESUMO

A eletrificação veicular tem ganhado destaque global como uma alternativa sustentável para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a conexão em larga escala de veículos elétricos (VEs) à rede de distribuição pode gerar impactos significativos, como quedas de tensão, sobrecarga em transformadores e aumento das perdas técnicas no sistema elétrico. Este estudo analisa esses efeitos por meio de simulações realizadas no software OpenDSS, considerando diferentes níveis de penetração de VEs em uma rede padrão da IEEE ao longo de um período de 48 horas. Os resultados mostram que altos níveis de penetração podem comprometer a estabilidade do sistema elétrico, reduzindo os níveis de tensão abaixo dos limites regulamentares e aumentando a potência demandada além da capacidade dos transformadores. Esse cenário destaca a necessidade de um planejamento adequado e de investimentos em infraestrutura para garantir a confiabilidade e eficiência do fornecimento de energia elétrica no contexto da eletrificação veicular.

Palavras-chave: veículos elétricos, rede de distribuição, OpenDSS, impactos elétricos.

ABSTRACT

Vehicle electrification has gained global prominence as a sustainable alternative to reducing greenhouse gas emissions. However, the large-scale integration of electric vehicles (EVs) into the distribution grid can lead to significant impacts, such as voltage drops, transformer overloads, and increased technical losses in the electrical system. This study analyzes these effects through simulations conducted using OpenDSS software, considering different levels of EV penetration in a standard IEEE network over a 48-hour period. The results indicate that high penetration levels can compromise the stability of the electrical system, reducing voltage levels below regulatory limits and increasing power demand beyond transformer capacity. This scenario highlights the need for proper planning and investments in infrastructure to ensure the reliability and efficiency of power supply in the context of vehicle electrification.

Keywords: electric vehicles, distribution network, OpenDSS, electrical impacts.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1.1 – Eletropostos Instalados no Brasil até 2023	11
Figura 2.1 – Tipos de Veículos Eletrificados	15
Figura 2.2 – Histórico das Vendas de Veículos Elétricos no Mundo (2012-2024).....	15
Figura 2.3 – Histórico dos Emplacamentos de Veículos Elétricos Leves no Brasil (2021 a Mai/2024)	16
Figura 2.4 – Emplacamentos de Veículos Elétricos no Brasil por Tecnologia (Jan/2024 a Mai/2024)	16
Figura 3.1 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 13 barras	19
Figura 3.2 – Curva de Potência Demandada na Rede	20
Figura 3.3 – Curva de Potência Demandada no Transformador	20
Figura 3.4 – Distribuição dos Horários Iniciais de Recarga dos Veículos Elétricos.....	21
Figura 3.5 – Potência de Carregamento das Baterias dos Veículos Elétricos em Função do Tempo.....	22
Figura 3.6 – Energia nas Baterias dos Veículos Elétricos durante Carregamento	22
Figura 3.7 – Modos de Recarga de Veículos Elétricos.....	23
Figura 3.8 – Faixas de Tensão em Relação à de Referência para Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV.....	25
Figura 4.1 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 0%)	27
Figura 4.2 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 0%)	27
Figura 4.3 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 15,4%)	28
Figura 4.4 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 15,4%)	28
Figura 4.5 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 30,7%)	29
Figura 4.6 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 30,7%)	30
Figura 4.7 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 61,5%)	31
Figura 4.8 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 61,5%)	31
Figura 4.9 – Análise das Perdas Técnicas no Transformador de Baixa Tensão.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Veículos Leves Eletrificados por Estado - Maio/2024	17
Tabela 3.1 – Faixas de Classificações de Tensões	24
Tabela 4.1 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 1	27
Tabela 4.2 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 2	28
Tabela 4.3 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 3	29
Tabela 4.4 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 4	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Contextualização.....	9
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Estrutura do Trabalho	12
2. VEÍCULOS ELÉTRICOS	13
2.1. Considerações Iniciais	13
2.2. Tipos de Veículos Elétricos	13
2.3. Veículos Elétricos no Brasil e no Mundo.....	15
3. METODOLOGIA.....	18
3.1. Considerações Iniciais	18
3.2. Sistema Teste.....	18
3.3. Modelagem de Demanda Residenciais.....	19
3.4. Modelagem de Recarga dos Veículos Elétricos.....	21
3.5. PRODIST	23
4. RESULTADOS	26
4.1. Considerações Iniciais	26
4.2. Caso 1: Nível de Penetração 0%	26
4.3. Caso 2: Nível de Penetração 15,4%	27
4.4. Caso 3: Nível de Penetração 30,7%	29
4.5. Caso 4: Nível de Penetração 61,5%	30
4.6. Perdas Técnicas	32
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	33
5.1. Conclusão	33
5.2. Trabalhos Futuros	34
REFERÊNCIAS	35
APÊNDICE A – Código OpenDSS – Simulação com Nível de Penetração de 15,4%.....	38

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

As emissões de gases de efeito estufa e seus impactos ambientais são uma preocupação mundial e têm sido amplamente debatida. As principais causas da mudança climática incluem o desmatamento, a emissão de gases poluentes e a queima de combustíveis fósseis. Na Conferência das Partes (COP), realizada em 2015 na França, foi criada a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês), um compromisso internacional no qual os países participantes devem revisar suas metas climáticas a cada cinco anos, tornando-as mais rigorosas e precisas. Este acordo tem como objetivo melhorar a resposta mundial em relação às verdadeiras causas da mudança climática, tendo como fim manter a temperatura global abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e continuar com esforços de limitar a elevação de temperatura além de 1,5 °C (Pacobello, 2024).

Uma solução promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis são os veículos elétricos (VEs). Nos últimos anos, avanços significativos na tecnologia de veículos elétricos, impulsionados por incentivos governamentais, resultaram em um aumento significativo nas vendas desses veículos. No ano de 2023, foram vendidos quase 14 milhões de veículos elétricos no mundo, um aumento de 33% em relação ao ano anterior, segundo a Agência Internacional de Energia. A China possui o maior estoque de veículos elétricos do mundo, com aproximadamente 21,8 milhões de unidades até 2023. Em seguida, os Estados Unidos somando 4,8 milhões de veículos elétricos, enquanto a Alemanha registrou um total de 2,5 milhões de unidades (IEA, 2024).

Na Noruega, diversas medidas foram implementadas para incentivar o uso de veículos elétricos, como a isenção do imposto sobre automóveis, circulação gratuita em todas as rodovias do país, acesso às faixas exclusivas para ônibus e estacionamento sem custos adicionais. Essas políticas resultaram em uma participação de 23% dos veículos elétricos na frota nacional. Em contraste, Portugal registra uma adesão de apenas 0,2%, apesar de adotar incentivos como descontos na compra e registro, além da isenção de taxas de venda e circulação (Espírito Santo, 2017).

No Brasil, a eletrificação avança em um ritmo mais moderado, pois o país não enfrenta grande pressão para acelerar essa transição. A matriz energética brasileira tem alta participação

de fontes renováveis, e o setor de transportes já conta com alternativas como os biocombustíveis. Por outro lado, regiões como a China, Índia e Europa, altamente dependentes da importação de petróleo e gás, têm maior urgência na migração para veículos elétricos (EPE, 2023). Além disso, países da Ásia Central e do Sul apresentam elevados índices de poluição atmosférica, o que reforça a necessidade de medidas para conter o aquecimento global (IQAIR, 2023).

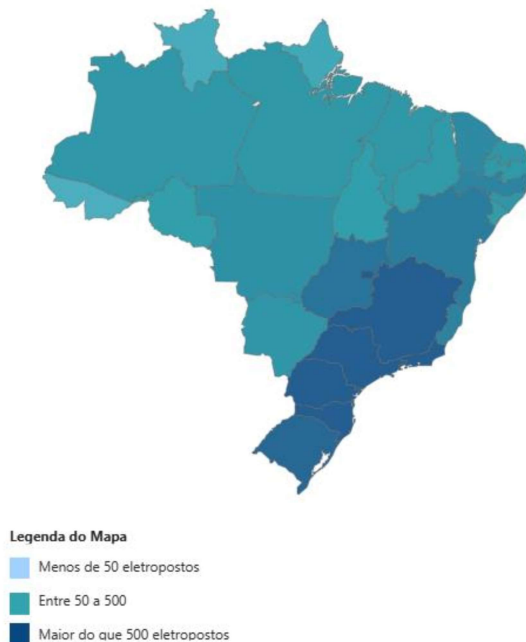
Ainda assim, a eletrificação no Brasil tem ganhado relevância. Em 2023, foram vendidos quase 94 mil veículos elétricos no país, sendo pouco mais que 19 mil veículos elétricos à bateria (VEB), segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico. Esse crescimento reflete os incentivos estaduais e municipais, como isenção de rodízios de veículos e descontos em impostos (EPE, 2023). De acordo com projeções da Empresa de Pesquisa Energética, a frota de VEH (Veículo Elétrico Híbrido) e VEB deve ultrapassar 1 milhão de unidades até 2030.

A expansão da eletrificação veicular enfrenta desafios significativos, como os altos custos da infraestrutura para postos de recarga, os preços elevados dos veículos, a disponibilidade limitada de matérias-primas essenciais, como níquel, lítio e cobalto. O desequilíbrio entre oferta e demanda desses materiais impacta os preços e dificulta a adoção em larga escala dos veículos elétricos (EPE, 2023). Além disso, a autonomia das baterias ainda representa um obstáculo relevante, especialmente em países com grandes extensões territoriais, como o Brasil, onde a infraestrutura de recarga é limitada e a distância entre os pontos de abastecimento pode dificultar longas viagens. Outro fator crítico é o tempo de carregamento: enquanto um veículo a combustão pode ser reabastecido em poucos minutos, um veículo elétrico pode levar cerca de seis horas para uma carga completa em carregadores convencionais ou quase uma hora nos carregadores rápidos (Angelim, 2023).

O crescimento da infraestrutura de recarga tem acompanhado a expansão da frota eletrificada. Em 2023, segundo a Agência Internacional de Energia, havia 3,23 milhões de eletropostos instalados em todo o mundo, sendo 1,39 milhão de carregamento rápido e 1,84 milhão de carregamento lento. No Brasil, o número de eletropostos cresceu significativamente, passando de 4.300 em dezembro de 2023 para 12.137 em novembro de 2024. Desse total, 10.621 são de carga lenta e 1.516 de carga rápida, conforme dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE). A distribuição desses pontos de recarga ainda é desigual, concentrando-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste, conforme evidenciado na Figura 1.1,

com destaque para o estado de São Paulo, que sozinho abriga 3.887 eletropostos, representando 32% do total nacional.

Figura 1.1 – Eletropostos Instalados no Brasil até 2023



Fonte: ABVE (2025)

Embora o uso ampliado de veículos elétricos tenha um impacto positivo no meio ambiente, é crucial compreender os efeitos dessa nova demanda sobre as redes de distribuição de energia elétrica. A conexão em massa desses veículos pode levar a um aumento na potência de ponta demandada, impactando toda a cadeia, desde a geração até os consumidores de baixa tensão (Silva, 2012). Esse aumento de carga elétrica pode gerar diversos impactos, como quedas de tensão, sobrecarga em transformadores e linhas de distribuição, aumento das perdas no sistema elétrico e distorção harmônica, comprometendo a qualidade do fornecimento de energia elétrica (Santo, 2017). Além disso, para que os veículos elétricos realmente contribuam para a redução das emissões de carbono, é essencial que a eletricidade que os alimenta venha de fontes limpas. Sem isso, as emissões apenas deixam de sair dos escapamentos para serem liberadas nas usinas. Com esse novo consumo, é necessário planejar o crescimento da geração elétrica com foco em fontes renováveis ou de baixo carbono (Lowry; Larminie, 2012).

1.2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento da tensão e da potência em um transformador, bem como as perdas técnicas na rede de distribuição, considerando diferentes cenários com a conexão de veículos elétricos. Serão avaliados os impactos dessa integração nos níveis de tensão e potência, proporcionando uma compreensão mais detalhada dos efeitos da eletrificação veicular sobre a qualidade e eficiência do fornecimento de energia.

1.3. Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os diferentes tipos de veículos elétricos, bem como o panorama da eletromobilidade no Brasil e no mundo. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, detalhando o sistema de teste utilizado e as modelagens de demanda e recarga dos VEs. No Capítulo 4, são discutidos os resultados das simulações, analisando os níveis de penetração dos VEs e seus impactos na estabilidade do sistema elétrico. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões do estudo, destacando suas contribuições e apontando possíveis direções para pesquisas futuras.

2. VEÍCULOS ELÉTRICOS

2.1. Considerações Iniciais

Os veículos elétricos se apresentam como uma solução viável para a redução das emissões de carbono, tornando-se uma opção atraente para aqueles que buscam alternativas de transporte mais sustentáveis. Do ponto de vista tecnológico, esses veículos são mais eficientes e emitem significativamente menos poluentes em comparação aos veículos convencionais. O rápido avanço na tecnologia de veículos elétricos tem possibilitado uma constante redução de custos, especialmente no que se refere às baterias, o que torna esses veículos cada vez mais acessíveis ao consumidor médio e contribui para sua crescente popularidade.

2.2. Tipos de Veículos Elétricos

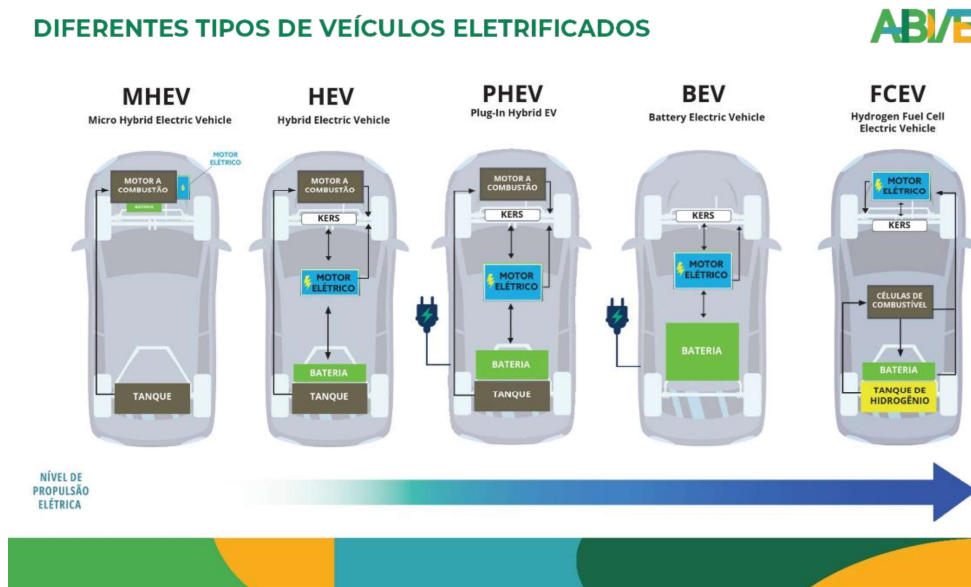
Os veículos elétricos (VEs) são automóveis que utilizam energia elétrica armazenada em baterias para alimentar um ou mais motores elétricos, oferecendo uma alternativa sustentável aos veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis (Rathore; Verma, 2023). Eles podem ser classificados de acordo com o tipo de propulsão, sendo puramente elétricos (totalmente dependentes de baterias) ou híbridos (combinando um motor elétrico e um motor a combustão interna). Além disso, os VEs podem ser diferenciados pelas fontes de energia que utilizam, conforme ilustrado na Figura 2.1, como baterias recarregáveis ou células a combustível de hidrogênio (Chau, 2016). A seguir, os principais tipos de VEs e suas características com base na fonte de energia.

- a) *Veículo Elétrico Micro-Híbrido* (VEMH ou MHEV): possui um motor a combustão interna com um sistema *start-stop* (partida-parada) desligando o motor automaticamente quando o veículo está parado e um gerador que alimenta uma bateria de 12 V através de um sistema de frenagem regenerativa convertendo energia cinética do veículo em energia elétrica (Rathore; Verma, 2023).
- b) *Veículo Elétrico Híbrido* (VEH ou HEV): combinam um motor a combustão interna (MCI) com um ou mais motores elétricos que utilizam energia armazenada em baterias que não podem ser recarregadas por um meio externo (Denton; Pells, 2023). O MCI é a principal fonte de propulsão, utilizando o motor elétrico em baixas demandas (Singh;

Gairola; Dwivedi, 2024). Os VEH's modernos fazem uso do sistema de frenagem regenerativa melhorando a eficiência (Rathore; Verma, 2023).

- c) *Veículo Elétrico Híbrido Plug-In* (VEHP ou PHEV): possui um motor a combustão interna (MCI), um motor elétrico e uma bateria que pode ser recarregada na rede elétrica, oferecendo uma autonomia elétrica maior que a dos VEHs (Rathore; Verma, 2023). O motor elétrico é a principal fonte de propulsão. Durante o carregamento, os veículos plug-in podem mais que dobrar a carga média de uma residência, o que levanta preocupações sobre o impacto na rede de distribuição, já que esses veículos podem ser conectados para carregamento em qualquer ponto da rede e a qualquer horário.
- d) *Veículo Elétrico à Bateria* (VEB ou BEV): são equipados somente com motor elétrico alimentado por uma bateria que pode ser recarregada diretamente na rede elétrica, portanto, sem emissão de poluentes pelo escapamento. Assim como os tipos de VEs mencionados anteriormente, os VEBs possuem sistema de frenagem regenerativa. A maioria dos VEBs possui uma autonomia que varia de 160 km a 480 km (Denton; Pells, 2023).
- e) *Veículo Elétrico a Célula de Combustível* (VEC ou FCEV): possuem um motor elétrico e bateria ambos alimentados por células de combustível que geram eletricidade a partir de hidrogênio e oxigênio do ar (Spellman, 2023). Este tipo de veículo é mais sustentável, pois não emite gases nocivos ao meio ambiente, liberando apenas vapor de água (Rathore; Verma, 2023). Apesar de ser uma excelente alternativa, a tecnologia ainda está em desenvolvimento e enfrenta desafios significativos, como o alto custo de produção do hidrogênio.

Figura 2.1 – Tipos de Veículos Eletrificados

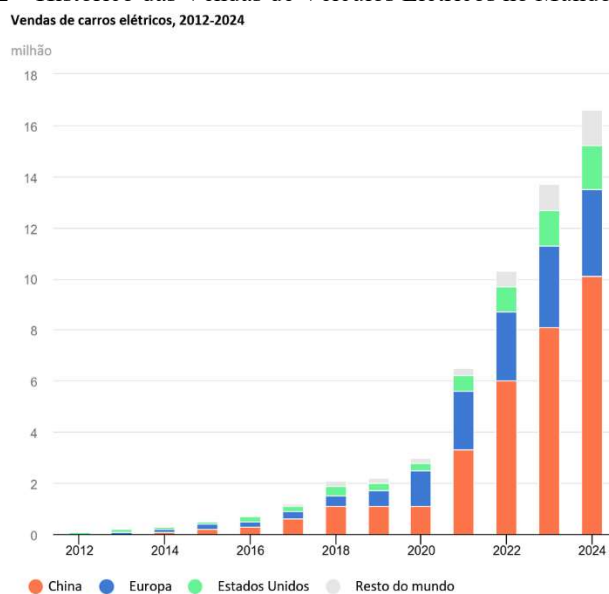


Fonte: ABVE (2024)

2.3. Veículos Elétricos no Brasil e no Mundo

Conforme dados da Agência Internacional de Energia (IEA), China, Europa e Estados Unidos lideram as vendas globais de veículos elétricos, respondendo por quase 95% das vendas totais. Em 2023, 18% dos carros vendidos no mundo foram elétricos, o que equivale a quase 14 milhões de unidades, elevando o número total de veículos elétricos nas estradas para 40 milhões (IEA, 2024). A Figura 2.2 ilustra o histórico de vendas anuais de veículos elétricos.


Figura 2.2 – Histórico das Vendas de Veículos Elétricos no Mundo (2012-2024)



Fonte: IEA (2024)

O Brasil se destaca como um dos líderes na venda de veículos elétricos na América Latina, acumulando um total de 285.339 veículos emplacados entre janeiro de 2012 e maio de 2024, conforme evidenciado na Figura 2.3. Em 2023, foram comercializadas aproximadamente 94 mil unidades (ABVE, 2024). Entre janeiro e maio de 2024, o número de veículos elétricos a bateria (BEV) e híbridos plug-in (PHEV) ultrapassou 44 mil unidades, com projeções da ABVE indicando que esse número pode chegar a 150 mil até o final do ano. Apesar desse crescimento, os veículos elétricos ainda representam apenas 0,5% da frota total de automóveis no Brasil, conforme dados do SENATRAN.

Figura 2.3 – Histórico dos Emplacamentos de Veículos Elétricos Leves no Brasil (2021 a Mai/2024)

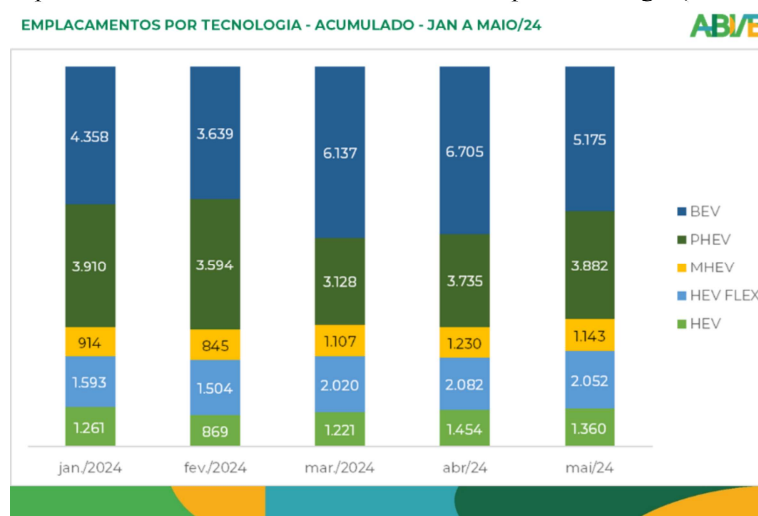
SÉRIE HISTÓRICA DE EMPLACAMENTO DE VEÍCULOS LEVES ELÉTRICOS NO BRASIL (BEV+PHEV) – 2021 A MAIO/24 

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2021	785	661	1.008	967	1.055	1.358	1.156	1.495	1.319	1.250	1.481	1.777	14.312
2022	1.017	1.093	1.026	1.160	1.392	1.949	1.279	1.833	3.700	1.795	1.529	2.187	19.960
2023	2.392	1.865	2.682	1.727	3.039	3.012	3.547	4.867	4.858	5.799	7.200	11.371	52.359
2024	8.268	7.233	9.265	10.440	9.057								44.263
TOTAL GERAL (2012 A 2024)													130.894

Fonte: ABVE (2024)

Os modelos mais vendidos no Brasil em maio de 2024 foram os veículos elétricos a bateria (BEV) e os híbridos plug-in (PHEV), representando 38% e 29% das vendas, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 2.4. Em seguida, os híbridos flex (HEV FLEX) somaram 15% das vendas, os híbridos a gasolina (HEV) 10%, e os micro-híbridos (MHEV) 8% (ABVE, 2024).

Figura 2.4 – Emplacamentos de Veículos Elétricos no Brasil por Tecnologia (Jan/2024 a Mai/2024)



Fonte: ABVE (2024)

Nos primeiros cinco meses de 2024, as montadoras que mais venderam veículos elétricos no Brasil foram BYD, com 27 mil unidades, GWM, com quase 10 mil unidades, e Toyota, com aproximadamente 9 mil veículos elétricos (ABVE, 2024). A Tabela 2.1 apresenta o ranking dos estados brasileiros em relação à quantidade de veículos elétricos emplacados em maio de 2024.

Tabela 2.1 – Veículos Leves Eletrificados por Estado - Maio/2024

Ranking	Estado	Total	% Participação
1º	São Paulo	4.684	34,41%
2º	Distrito Federal	1.200	8,82%
3º	Rio de Janeiro	997	7,32%
18º	Pará	158	1,16%

Fonte: ABVE (2024)

3. METODOLOGIA

3.1. Considerações Iniciais

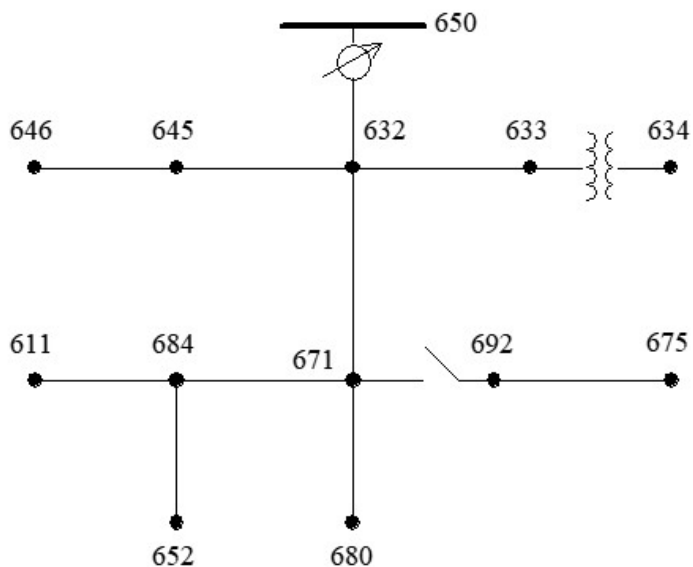
As simulações deste estudo foram realizadas utilizando o software OpenDSS, uma ferramenta de código aberto desenvolvida pela *Electric Power Research Institute* (EPRI) em 1997, amplamente acessível para download na internet. O OpenDSS foi projetado para a modelagem e simulação de redes de distribuição de energia elétrica (Duffy; McDermott, 2009).

A análise foi conduzida em um sistema de distribuição de energia elétrica ao longo de um período de 48 horas, focando especificamente na barra 634 do sistema IEEE de 13 barras (“*Resources – IEEE PES Test Feeder*”, [s.d.]). Para garantir maior fidelidade à realidade, as cargas residenciais foram modeladas com base em perfis de consumo típicos, enquanto os veículos elétricos seguiram padrões específicos de recarga, refletindo diferentes hábitos de uso e estratégias de carregamento.

3.2. Sistema Teste

A rede IEEE é composta por 13 barras (Figura 3.1) e opera com um sistema trifásico cuja tensão base é de 115 kV. A rede inclui um transformador trifásico de alimentação conectado em delta-Y e com capacidade de 5000 kVA, que reduz a tensão de 115 kV para 4,16 kV entre a barra de alimentação e a barra 650. Entre as barras 650 e 632, há um regulador de tensão instalado para assegurar a estabilidade da tensão. Além disso, um transformador trifásico com conexão Y-Y e potência igual a 500 kVA localizado entre as barras 633 e 634 converte a tensão de 4,16 kV para 480 V. A rede também possui capacitores para correção do fator de potência, sendo um capacitor trifásico de 600 kVAr localizado na barra 675 e um capacitor monofásico de 100 kVAr na fase 3 da barra 611. Por fim, há uma chave trifásica normalmente fechada entre as barras 671 e 692, permitindo a configuração adequada da rede.

Figura 3.1 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 13 barras

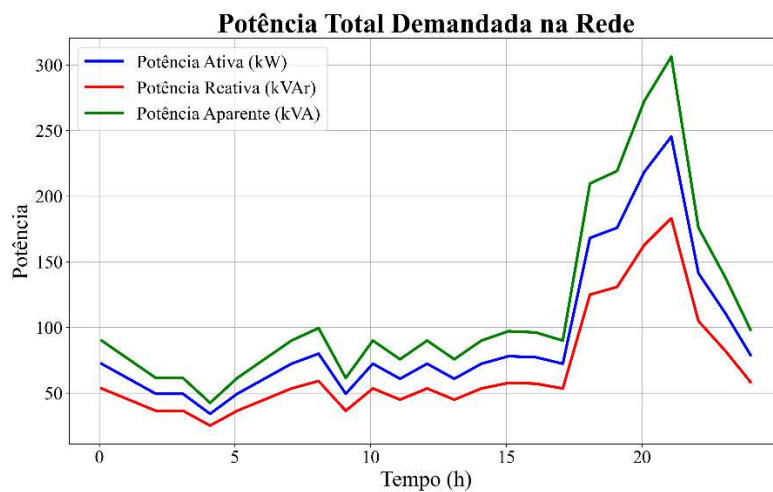


Fonte: IEEE (2024)

3.3. Modelagem de Demanda Residenciais

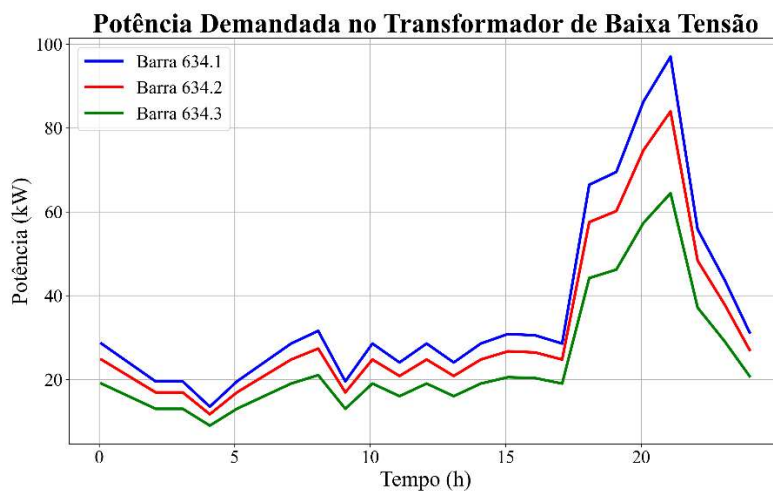
Os hábitos de consumo de energia nas residências variam significativamente ao longo do dia, refletindo as rotinas diárias dos moradores. Tipicamente, o consumo de energia é mais baixo durante a madrugada, aumentando gradualmente a partir das primeiras horas da manhã quando as pessoas se preparam para o trabalho e a escola. O consumo atinge um pico durante as horas da noite, quando as atividades domésticas e o uso de aparelhos eletrônicos e de iluminação são mais intensos. A Figura 3.2 apresenta a curva de potência total demandada na rede ao longo de 24 horas, utilizada para simular o consumo das cargas residenciais. Por sua vez, a Figura 3.3 ilustra a potência demandada individualmente em cada fase do transformador de baixa tensão.

Figura 3.2 – Curva de Potência Demandada na Rede



Fonte: Autor (2024)

Figura 3.3 – Curva de Potência Demandada no Transformador



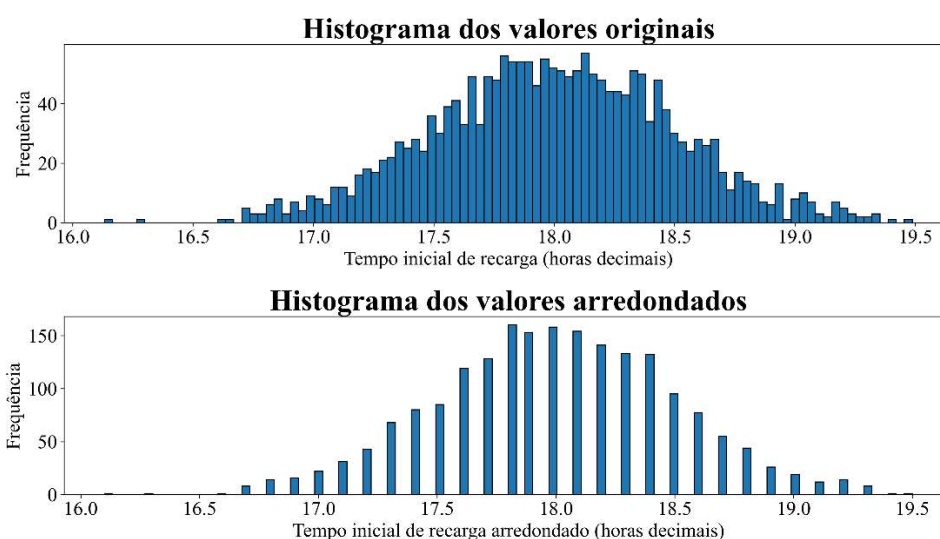
Fonte: Autor (2024)

A barra 634, utilizada como objeto de estudo, possui uma potência de carga de 380 kW, correspondente a carga demandada de aproximadamente 195 residências. Esse dado é baseado em um levantamento de cargas realizado em um artigo cujo cenário de pesquisa foi um condomínio localizado em Belém do Pará (Ferreira; Affonso, 2024). A carga está distribuída entre três cargas monofásicas conectadas em configuração estrela, divididas entre as fases da seguinte forma: 150 kW e 110 kVAr na fase 1, 130 kW e 100 kVAr na fase 2, e 100 kW e 70 kVAr na fase 3.

3.4. Modelagem de Recarga dos Veículos Elétricos

A modelagem da curva de recarga dos veículos elétricos foi feita com base no modelo BYD Dolphin com 44,9 kWh. Os horários iniciais de recarga dos veículos elétricos foram estabelecidos com base em uma curva de distribuição normal, com média igual a 18 e desvio padrão de 0,5. A partir dessa distribuição, foram geradas 2000 amostras, fornecendo uma visão mais realista dos momentos de início de recarga. O histograma da Figura 3.4 mostra os valores gerados a partir da curva de distribuição normal, com valores arredondados para uma casa decimal.

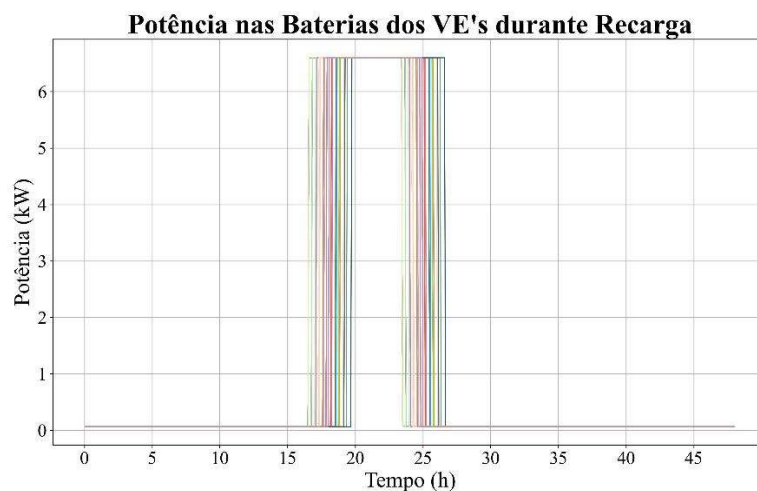
Figura 3.4 – Distribuição dos Horários Iniciais de Recarga dos Veículos Elétricos



Fonte: Autor (2024)

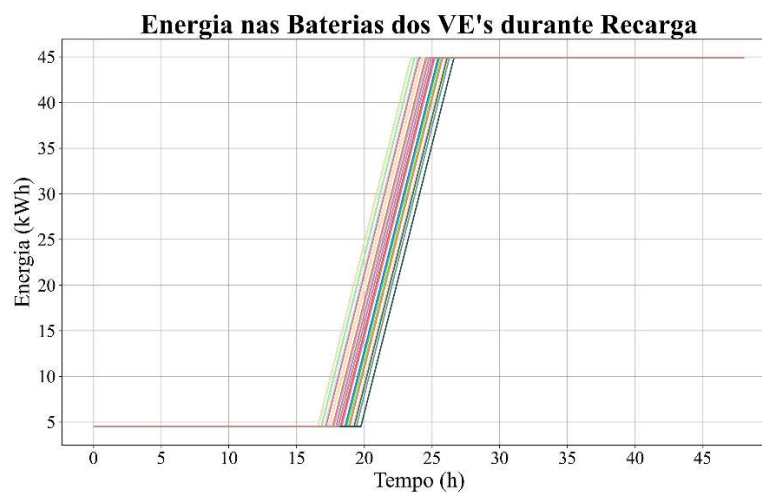
A partir dessa curva, foram escolhidos 20 valores aleatórios para o tempo inicial de recarga. Considerou-se um Estado de Carga inicial (SOC_i) igual a 10% da capacidade máxima da bateria. O tempo necessário para a carga total dos VEs, considerando o SOC_i igual a 4,49 kWh, é de aproximadamente 6,8 horas. A Figura 3.5 apresenta a curva de recarga de cada veículo ao longo do tempo e a Figura 3.6 apresenta o estado de recarga da bateria.

Figura 3.5 – Potência de Carregamento das Baterias dos Veículos Elétricos em Função do Tempo



Fonte: Autor (2024)

Figura 3.6 – Energia nas Baterias dos Veículos Elétricos durante Carregamento



Fonte: Autor (2024)

De acordo com a Norma Técnica - NT.042 rev. 02 – 2023, o método de recarga que deve ser utilizado para a bateria do VE modelo BYD Dolphin é o monofásico, como ilustrado no Modo 3 na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Modos de Recarga de Veículos Elétricos

Tabela 1 - Modos de Recarga VE

MODO 1	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão com Plugues e Cabos a rede • Sem função Piloto- Comando • Máximo 16A, 250V / 480V (monofásico / trifásico); • Proibido e descontinuado por muitos países e montadoras • Condutor terra
MODO 2	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão com Plugues e Cabos com a rede • Com função Piloto - Comando • Carregador on-board; • Máximo 32A, 250V / 480V (monofásico / trifásico); • Sistema de proteção das pessoas contra choques elétricos (DDR) • Condutor Terra
MODO 3	<ul style="list-style-type: none"> • Conexão Permanente do VE à rede de alimentação em corrente alternada utilizando o sistema de alimentação para VE (SAVE) • Requer uma caixa montada na parede ou similares, para entregar mais potência e com as proteções e circuitos de comando e controle necessários • Máximo 32A / 63A, 250V / 480V (monofásico / trifásico); Valores típicos de 3,7kW / 7kW para conexões monofásicas e 11kW / 22kW e até 43kW para conexões trifásicas
MODO 4	<ul style="list-style-type: none"> • Permite a conexão de um VE a uma rede de alimentação em corrente alternada ou em corrente contínua • Conexão do VE à rede de alimentação em corrente alternada utilizando um carregador externo. • Função-piloto de comando se estende aos dispositivos conectados permanentemente à alimentação em corrente alternada

Fonte: NT.042 (Equatorial Energia, 2023)

3.5. PRODIST

A resolução normativa da ANEEL nº 956/2021 estabelece os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O Módulo 8 do PRODIST estabelece diretrizes para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, incluindo as variações de tensão em regime permanente. A seção 8.1 define os níveis de tensão com base na tensão de referência, que

corresponde ao valor nominal ou contratado pelas unidades consumidoras. Esses níveis são classificados em três faixas:

- a) Tensão adequada: dentro dos limites normais de operação, garantindo o fornecimento adequado de energia.
- b) Tensão precária: fora da faixa ideal, exigindo medidas corretivas para evitar impactos no sistema e nos equipamentos dos consumidores.
- c) Tensão crítica: variação extrema que compromete o funcionamento da rede elétrica, demandando correção imediata.

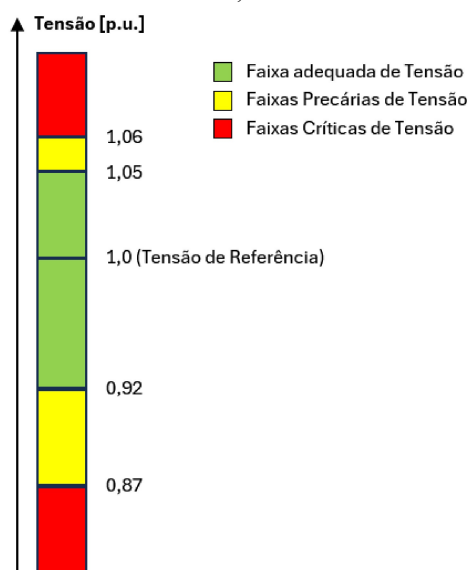
O Anexo 8.A apresenta tabelas com as faixas de variação da tensão de leitura em relação à tensão de referência. A Tabela 3.1 exibe esses limites para alguns valores de tensões nominais inferiores a 2,3 kV, enquanto a Figura 3.8 ilustra essas variações em pu. Para valores abaixo de 2,3 kV, os valores de tensão em pu são constantes para as tensões apresentadas no PRODIST.

Tabela 3.1 – Faixas de Classificações de Tensões

<i>Tensão de Atendimento</i>	<i>220/127</i>	<i>380/220</i>
<i>Adequada</i>	$(202 \leq TL \leq 231) /$ $(117 \leq TL \leq 133)$	$(350 \leq TL \leq 399) /$ $(202 \leq TL \leq 231)$
<i>Precária</i>	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) /$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
<i>Crítica</i>	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) /$ $(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) /$ $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Adaptada de Módulo 8 PRODIST (ANEEL, 2021)

Figura 3.8 – Faixas de Tensão em Relação à de Referência para Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV



Fonte: Módulo 8 PRODIST, elaborada pelo autor.

4. RESULTADOS

4.1. Considerações Iniciais

Com base na curva de carga residencial e da curva de recarga dos VEs, demonstrados nas seções 3 e 4 do capítulo anterior, foram obtidos os resultados dos níveis de tensão e potência no secundário do transformador. A bateria do modelo de VE utilizado para simulação possui as seguintes características:

- Modelo: BYD Dolphin
- Capacidade nominal da bateria: 44,9 kWh
- Potência de carregamento AC: 6,6 kW

O nível de penetração de veículos elétricos é calculado pela equação 4.1.

$$NP = \frac{N_{VE}}{N_R} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

NP: Nível de penetração de veículos elétricos na rede (%);

N_{VE} : Quantidade de veículos elétricos na rede;

N_R : Quantidade de residências.

Neste estudo foram analisados quatro níveis de penetração de veículos elétricos no Transformador: 0%, 15,4%, 30,7% e 61,5%. Foram realizadas simulações de 48 horas devido à recarga dos VEs que se estende de um dia para o outro. Além disso, para melhor análise, o regulador de tensão e os capacitores do circuito foram desabilitados.

4.2. Caso 1: Nível de Penetração 0%

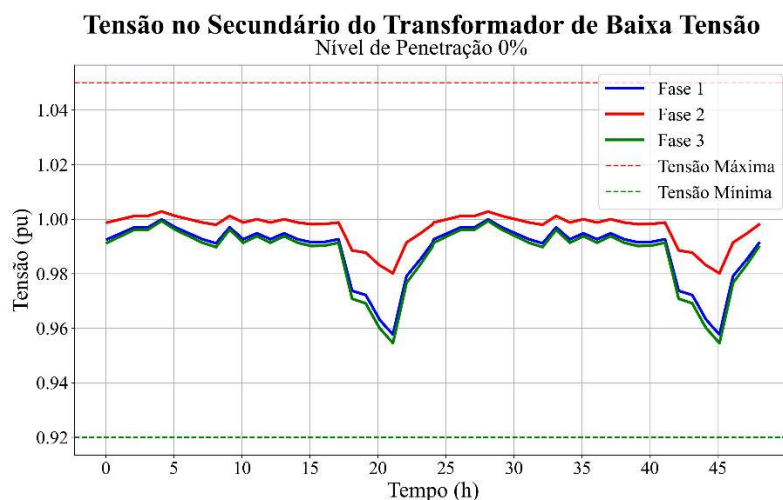
No caso 1 foi considerado o sistema sem conexão de VEs na rede, ou seja, o nível de penetração é igual a 0%, conforme parâmetros de carga apresentados na Tabela 4.1. Nesse cenário, os valores de tensão e potência no transformador estão dentro dos níveis adequados de funcionamento, como demonstrado na Figura 4.1 e Figura 4.2. Esse cenário serve como referência para a análise dos impactos progressivos da eletrificação veicular nos casos subsequentes.

Tabela 4.1 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 1

	Potência Demandada (kW)	Quant. Residências	Quant. VEs	Potência Total VEs (kW)	Potência Total Sistema (kW)	Nível de Penetração (%)
Fase 1	150	77	0	0	150	0%
Fase 2	130	67	0	0	130	0%
Fase 3	100	51	0	0	100	0%
Total	380	195	0	0	380	0%

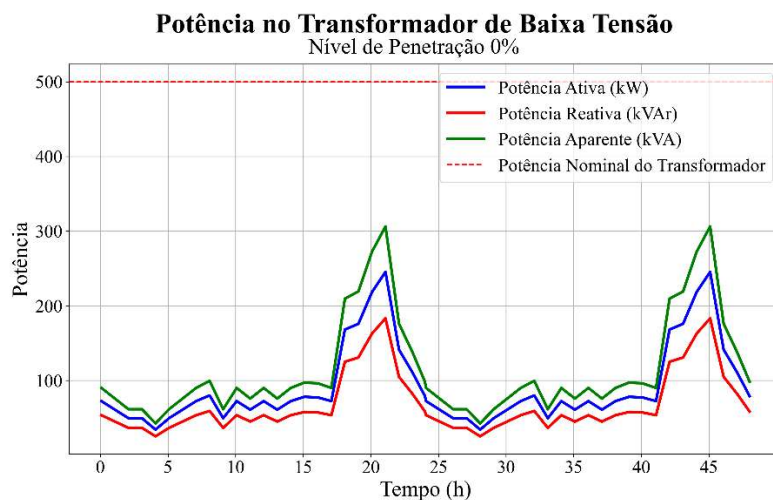
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.1 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 0%)



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.2 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 0%)



Fonte: Autor (2024)

4.3. Caso 2: Nível de Penetração 15,4%

No caso 2 foram adicionados 30 VEs no sistema, representando um nível de penetração igual a 15,4%, conforme parâmetros de carga apresentados na Tabela 4.2. Nesse cenário, os

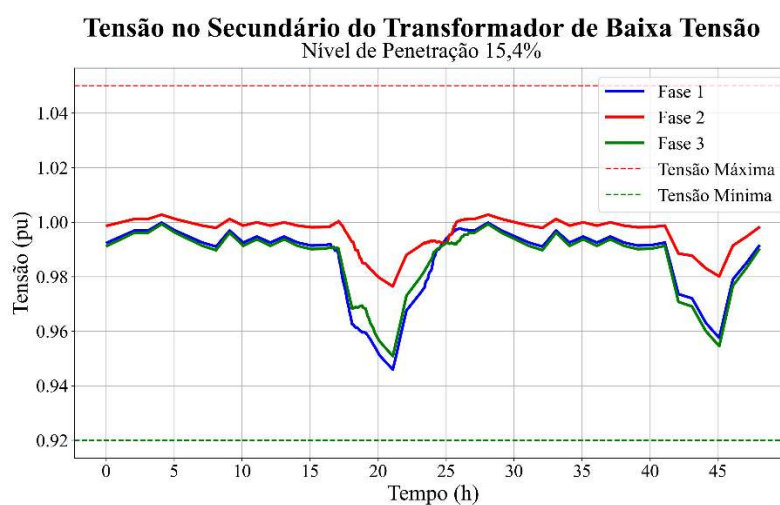
níveis de tensão e potência do transformador ficaram dentro dos limites adequados de funcionamento, como demonstrado na Figura 4.3 e Figura 4.4.

Tabela 4.2 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 2

	Potência Demandada (kW)	Quant. Residências	Quant. VEs	Potência Total VEs (kW)	Potência Total Sistema (kW)	Nível de Penetração (%)
Fase 1	150	77	15	99	249	19%
Fase 2	130	67	10	66	196	15%
Fase 3	100	51	5	33	133	10%
Total	380	195	30	198	578	15,4%

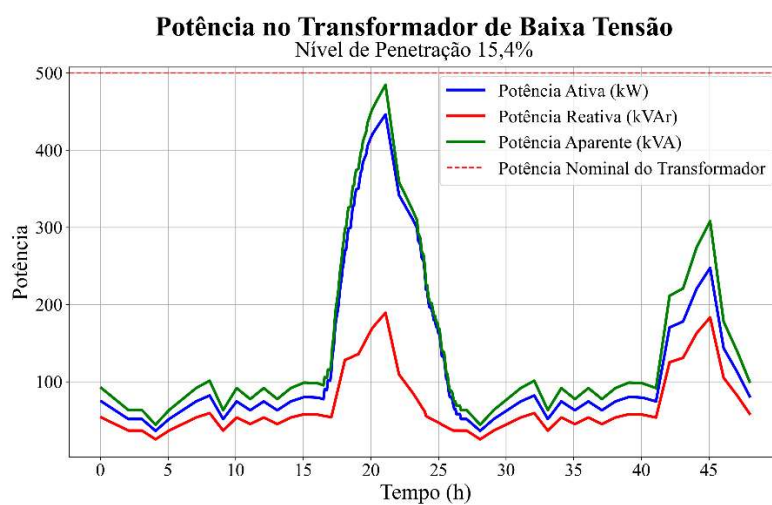
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.3 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 15,4%)



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.4 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 15,4%)



Fonte: Autor (2024)

4.4. Caso 3: Nível de Penetração 30,7%

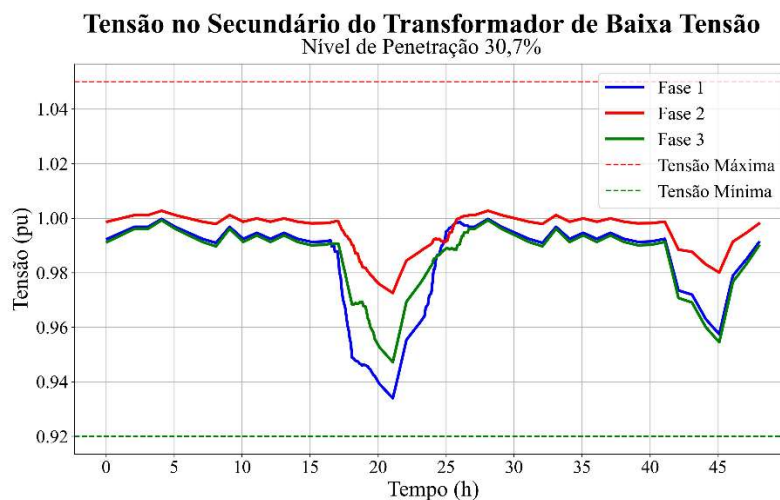
No caso 3 foram adicionados 60 VEs no sistema, representando um nível de penetração igual a 30,7%, conforme parâmetros de carga apresentados na Tabela 4.3. Nesse cenário, os valores de tensão permaneceram dentro dos limites adequados de funcionamento (Figura 4.5), porém em um determinado período, a potência total excedeu a capacidade nominal do transformador, como demonstrado na Figura 4.6.

Tabela 4.3 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 3

	Potência Demandada (kW)	Quant. Residências	Quant. VEs	Potência Total VEs (kW)	Potência Total Sistema (kW)	Nível de Penetração (%)
Fase 1	150	77	30	198	348	39%
Fase 2	130	67	20	132	262	30%
Fase 3	100	51	10	66	166	19%
Total	380	195	60	396	776	30,7%

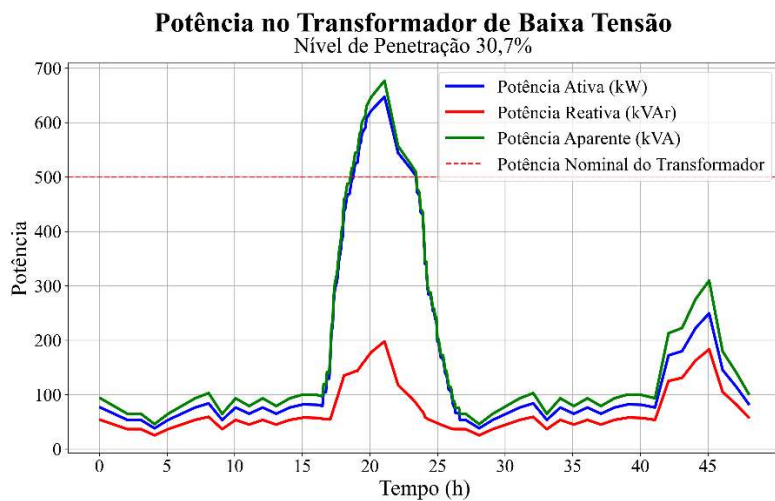
Fonte: Autor (2024)

Figura 4.5 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 30,7%)



Fonte: Autor (2024)

Figura 4.6 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 30,7%)



4.5. Caso 4: Nível de Penetração 61,5%

No caso 4 foram adicionados 120 VEs no sistema, representando um nível de penetração igual a 61,5%, conforme parâmetros de carga apresentados na Tabela 4.4. Nesse cenário, o nível de tensão do transformador ultrapassou o limite mínimo de tensão permitido pela ANEEL (Figura 4.7) e a potência total excedeu mais que o dobro da capacidade nominal do transformador, como demonstrado na Figura 4.8.

Tabela 4.4 – Parâmetros de Carga na Barra 634 - Caso 4

	Potência Demandada (kW)	Quant. Residências	Quant. VEs	Potência Total VEs (kW)	Potência Total Sistema (kW)	Nível de Penetração (%)
Fase 1	150	77	60	396	546	78%
Fase 2	130	67	40	264	394	60%
Fase 3	100	51	20	132	232	39%
Total	380	195	120	792	1172	61,5%

Fonte: Autor (2024)

Figura 4.7 – Análise da Tensão no Secundário do Transformador de Baixa Tensão (NP: 61,5%)

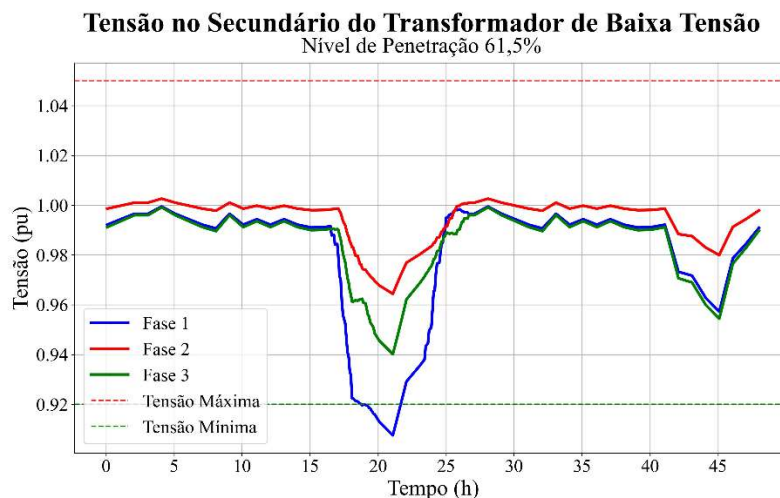
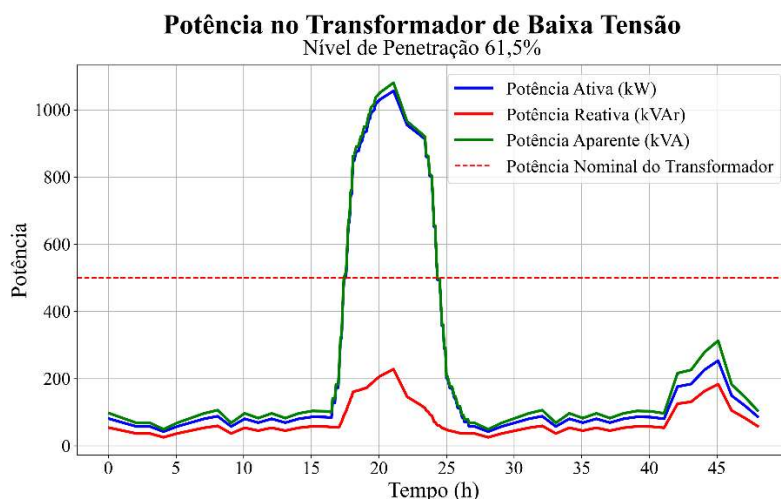


Figura 4.8 – Análise da Potência Demandada no Transformador de Baixa Tensão (NP: 61,5%)



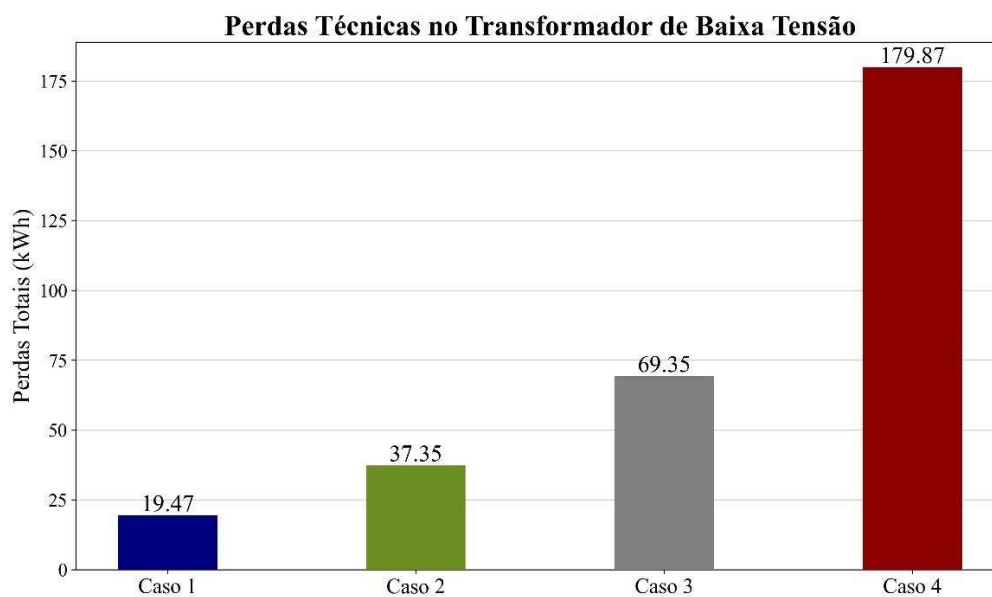
À medida que a quantidade de veículos elétricos (VEs) conectados à rede aumenta, observa-se uma redução nos níveis de tensão e um crescimento na potência demandada pelo transformador. No primeiro caso, sem a presença de VEs (0% de penetração), os valores de tensão e potência permanecem dentro dos limites adequados, servindo como base de comparação para os demais cenários. Com a inserção de 30 VEs (15,4% de penetração), no caso 2, os níveis de tensão e potência ainda se mantêm dentro dos padrões aceitáveis. No entanto, no caso 3, com 60 VEs (30,7% de penetração), embora a tensão permaneça dentro dos limites, a potência total ultrapassa a capacidade nominal do transformador em determinados períodos. Já no caso 4, com 120 VEs (61,5% de penetração), os impactos se tornam mais

críticos: a tensão atinge níveis abaixo do mínimo permitido pela ANEEL e a potência demandada ultrapassa em mais de duas vezes a capacidade nominal do transformador.

4.6. Perdas Técnicas

Considerando um período de 48 horas de simulação para diferentes níveis de penetração de veículos elétricos - 0% (Caso 1), 15,4% (Caso 2), 30,7% (Caso 3) e 61,5% (Caso 4) -, observa-se um aumento progressivo das perdas no transformador à medida que mais veículos são conectados à rede, como evidenciado na Figura 4.9. No Caso 1, as perdas foram mínimas, totalizando 19,47 kWh. Com a elevação da penetração de veículos elétricos, essas perdas aumentaram para 37,35 kWh no Caso 2 e 69,35 kWh no Caso 3. O impacto mais significativo ocorreu no Caso 4, onde as perdas atingiram aproximadamente 180 kWh, evidenciando o efeito expressivo da alta demanda sobre o transformador.

Figura 4.9 – Análise das Perdas Técnicas no Transformador de Baixa Tensão



Fonte: Autor (2024)

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar os impactos técnicos da integração em larga escala de veículos elétricos à rede de distribuição de baixa tensão, considerando efeitos como queda de tensão, aumento da potência demandada e perdas técnicas no sistema elétrico. Para isso, foi utilizada uma rede padrão da IEEE, na qual foram simulados diferentes níveis de penetração de veículos elétricos (0%, 15,4%, 30,7% e 61,5%) ao longo de um período de 48 horas. As simulações foram realizadas no software OpenDSS, permitindo avaliar o comportamento da rede diante do avanço da eletrificação veicular.

Os resultados indicam que uma alta penetração de veículos elétricos na rede de distribuição pode provocar quedas expressivas nos níveis de tensão e um aumento significativo na potência demandada pelos transformadores. Esse efeito é mais significativo no cenário com 61,5% de penetração, no qual a tensão chegou a 0,91 pu, ficando abaixo do limite de 0,92 pu estipulado pela ANEEL, enquanto a potência demandada ultrapassou a capacidade nominal do transformador. Além disso, nesse mesmo cenário, as perdas de energia no transformador foram estimadas em aproximadamente 180 kWh.

Os estudos realizados indicam que, embora a adoção de veículos elétricos no Brasil tenha apresentado um crescimento significativo, sua participação na frota total ainda é pequena em comparação com os automóveis movidos a combustão. Esse cenário se deve, entre outros fatores, ao alto custo dos veículos elétricos e à distribuição desigual da infraestrutura de recarga no país. No entanto, com a ampliação dos incentivos por meio de políticas públicas e os avanços tecnológicos, o Brasil apresenta um cenário promissor para a expansão da eletrificação veicular.

Os resultados das simulações reforçam a necessidade de um planejamento estratégico para a expansão da infraestrutura elétrica. Mesmo que o cenário de 61,5% de penetração ainda esteja distante da realidade atual, a crescente adoção de veículos elétricos exige que as concessionárias de energia antecipem os desafios e invistam em medidas para garantir a estabilidade e a eficiência do sistema elétrico. O planejamento adequado da infraestrutura elétrica será fundamental para garantir a estabilidade do sistema e atender à crescente demanda por recarga de veículos elétricos de forma eficiente.

5.2. Trabalhos Futuros

Com o crescimento dos veículos elétricos, fica cada vez mais evidente a necessidade de soluções para minimizar os impactos na rede elétrica. Uma das alternativas que pode ser explorada em estudos futuros é a recarga inteligente, que permite gerenciar a recarga dos veículos de forma mais eficiente, evitando sobrecarga nos transformadores e quedas de tensão.

Além disso, integrar estratégias de carregamento com tecnologias como redes inteligentes (*smart grids*) e sistemas de armazenamento de energia pode abrir novas possibilidades para tornar a eletrificação dos veículos mais sustentável e viável para o futuro.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa N° 956. PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. p. 70, 2021.

ANGELIM, Jorge Henrique Costa. Estimação probabilística dos efeitos da recarga de veículos elétricos de longo alcance em sistemas de distribuição de energia. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Eletromobilidade. Disponível em: <http://abve.org.br>. Acesso em: 11 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Números de maio confirmam a interiorização da eletromobilidade no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.abve.org.br>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CHAU, K. T. Energy systems for electric and hybrid vehicles. London: The Institution of Engineering and Technology, 2016.

DENTON, T.; PELLIS, H. Introduction to electric vehicles. Routledge eBooks, p. 1–14, 23 nov. 2023.

DUFFY, Roger; McDERMOTT, Thomas. Introduction to the OpenDSS. 2009. Disponível em: <https://www.epri.com/research/products/000000000001020676>. Acesso em: 13 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Janeiro de 2023.

ENGE, P.; ENGE, N.; ZOEPF, S. Electric Vehicle Engineering. [s.l.] McGraw Hill Professional, 2021.

EQUATORIAL ENERGIA. Critérios de Conexão para Estações de Recarga de Veículos Elétricos. Norma Técnica NT.042, Revisão 02, 2023.

FERREIRA, V. L. N.; AFFONSO, C. M. Análise Probabilística do Controle Volt-Watt em uma Rede de Distribuição Residencial. In: Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2024.

FROMER, C. Números de maio confirmam a interiorização da eletromobilidade no Brasil. Disponível em: <https://abve.org.br/numeros-de-maio-apontam-que-interiorizacao-da-eletromobilidade-avanca-no-brasil/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

IEA. Electric car sales, 2012–2024. Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2012-2024>. Licença: CC BY 4.0.

IEA. Global EV Outlook 2024. Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Licença: CC BY 4.0.

IQAIR. 2023 World Air Quality Report. 2023.

LOWRY, J.; LARMINIE, J. Electric vehicle technology explained. Hoboken: Wiley, 2012.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Secretaria Nacional de Trânsito. Estatísticas - Frota de Veículos - SENATRAN. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/estatisticas-frota-de-veiculos>. Acesso em: 14 fev. 2025.

PACOBELLO, Daniella Ribeiro. Políticas de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE): Um Estudo Comparativo da Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil, Alemanha, China, Estados Unidos, Namíbia e Portugal. Pontifícia Universidade Católica de Campinas: [s.n.].

RATHORE, Akshay Kumar; VERMA, Arun Kumar. Advanced Concepts and Technologies for Electric Vehicles. [s.l.] Informa, 2023.

RESOURCES – IEEE PES Test Feeder. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 8 fev. 2024.

SANTO, João Pedro Anselmo Espírito. Prolongamento da Vida Útil de um Transformador através do Agendamento do Carregamento de Veículos Elétricos numa Unidade Industrial Insular com Microgeração Fotovoltaica. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/105325>. Acesso em: 12 fev. 2025.

SILVA, Vera Lúcia Paiva da. Impactos no Sistema Elétrico de Energia. Electricité de France (EDF), 2019. Disponível em: http://www.rte-france.com/uploads/media/pdf_zip/nos-activit-s/bilan_complet_2009.pdf. Acesso em: 12 fev. 2025.

SINGH, S.; SANJAY, Gairola; DWIVEDI, S. Electric Vehicle Components and Charging Technologies. [s.l: s.n.].

SPELLMAN, F. R. The Science of Electric Vehicles. [s.l: s.n.].

APÊNDICE A – Código OpenDSS – Simulação com Nível de Penetração de 15,4%

```

Clear
// Criando um novo circuito
New circuit.IEEE13Nodeckt
~ basekv=115 pu=1.0001 phases=3 bus1=SourceBus
~ Angle=30
~ MVAsc3=20000 MVASC1=21000
// Transformador de alimentacao
New Transformer.Sub Phases=3 Windings=2 XHL=(8 1000 /)
~ wdg=1 bus=SourceBus conn=delta kv=115 kva=5000 %r=(.5 1000 /) XHT=4
~ wdg=2 bus=650 conn=wye kv=4.16 kva=5000 %r=(.5 1000 /) XLT=4
// Reguladores de tensao
New Transformer.Reg1 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666]
~ Buses=[650.1 RG60.1] kVs=[2.4 2.4] %LoadLoss=0.01
new regcontrol.Reg1 transformer=Reg1 winding=2 vreg=122 band=2 ptratio=20 ctprim=700 R=3 X=9
enabled=no
New Transformer.Reg2 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666]
~ Buses=[650.2 RG60.2] kVs=[2.4 2.4] %LoadLoss=0.01
new regcontrol.Reg2 transformer=Reg2 winding=2 vreg=122 band=2 ptratio=20 ctprim=700 R=3 X=9
enabled=no
New Transformer.Reg3 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666]
~ Buses=[650.3 RG60.3] kVs=[2.4 2.4] %LoadLoss=0.01
new regcontrol.Reg3 transformer=Reg3 winding=2 vreg=122 band=2 ptratio=20 ctprim=700 R=3 X=9
enabled=no
// Transformador (baixa tensao)
New Transformer.XFM1 Phases=3 Windings=2 XHL=2
~ wdg=1 bus=633 conn=Wye kv=4.16 kva=500 %r=.55 XHT=1
~ wdg=2 bus=634 conn=Wye kv=0.480 kva=500 %r=.55 XLT=1
// Informacoes das linhas
New linecode.mtx601 nphases=3 BaseFreq=60
~ rmatrix = (0.3465 | 0.1560 0.3375 | 0.1580 0.1535 0.3414 )
~ xmatrix = (1.0179 | 0.5017 1.0478 | 0.4236 0.3849 1.0348 )
~ units=mi
New linecode.mtx602 nphases=3 BaseFreq=60
~ rmatrix = (0.7526 | 0.1580 0.7475 | 0.1560 0.1535 0.7436 )
~ xmatrix = (1.1814 | 0.4236 1.1983 | 0.5017 0.3849 1.2112 )
~ units=mi
New linecode.mtx603 nphases=2 BaseFreq=60
~ rmatrix = (1.3238 | 0.2066 1.3294 )
~ xmatrix = (1.3569 | 0.4591 1.3471 )
~ units=mi
New linecode.mtx604 nphases=2 BaseFreq=60
~ rmatrix = (1.3238 | 0.2066 1.3294 )
~ xmatrix = (1.3569 | 0.4591 1.3471 )
~ units=mi
New linecode.mtx605 nphases=1 BaseFreq=60
~ rmatrix = (1.3292 )
~ xmatrix = (1.3475 )
~ units=mi
New linecode.mtx606 nphases=3 Units=mi
~ rmatrix=(0.791721 |0.318476 0.781649 |0.28345 0.318476 0.791721 )
~ xmatrix=(0.438352 |0.0276838 0.396697 |-0.0184204 0.0276838 0.438352 )
~ cmatrix=[383.948 |0 383.948 |0 0 383.948 ]
New linecode.mtx607 nphases=1 BaseFreq=60
~ rmatrix = (1.3425 )
~ xmatrix = (0.5124 )
~ cmatrix = [236]
~ units=mi
// Perfil de carga a ser utilizado
New loadshape.PerfilCargas npts=288 interval=0.08333333333333333
~ mult=(0.19000      0.187500.185000.182500.180000.177500.175000.172500.170000.16750
      0.165000.162500.160000.157500.155000.152500.150000.147500.145000.142500.14000
      0.137500.135000.132500.130000.130000.130000.130000.130000.130000.130000.13000
      0.130000.130000.130000.130000.130000.126670.123330.120000.116670.113330.11000

```

```

0.106670.103330.100000.096670.093330.090000.093330.096670.100000.103330.10667
0.110000.113330.116670.120000.123330.126670.130000.132500.135000.137500.14000
0.142500.145000.147500.150000.152500.155000.157500.160000.162500.165000.16750
0.170000.172500.175000.177500.180000.182500.185000.187500.190000.191670.19333
0.195000.196670.198330.200000.201670.203330.205000.206670.208330.210000.20333
0.196670.190000.183330.176670.170000.163330.156670.150000.143330.136670.13000
0.135000.140000.145000.150000.155000.160000.165000.170000.175000.180000.18500
0.190000.187500.185000.182500.180000.177500.175000.172500.170000.167500.16500
0.162500.160000.162500.165000.167500.170000.172500.175000.177500.180000.18250
0.185000.187500.190000.187500.185000.182500.180000.177500.175000.172500.17000
0.167500.165000.162500.160000.162500.165000.167500.170000.172500.175000.17750
0.180000.182500.185000.187500.190000.191250.192500.193750.195000.196250.19750
0.198750.200000.201250.202500.203750.205000.204830.204670.204500.204330.20417
0.204000.203830.203670.203500.203330.203170.203000.201920.200830.199750.19867
0.197580.196500.195420.194330.193250.192170.191080.190000.210830.231670.25250
0.273330.294170.315000.335830.356670.377500.398330.419170.440000.441670.44333
0.445000.446670.448330.450000.451670.453330.455000.456670.458330.460000.46917
0.478330.487500.496670.505830.515000.524170.533330.542500.551670.560830.57000
0.575830.581670.587500.593330.599170.605000.610830.616670.622500.628330.63417
0.640000.617500.595000.572500.550000.527500.505000.482500.460000.437500.41500
0.392500.370000.363330.356670.350000.343330.336670.330000.323330.316670.31000
0.303330.296670.290000.282500.275000.267500.260000.252500.245000.237500.23000
0.222500.215000.20750)
// Cargas
New Load.671 Bus1=671.1.2.3 Phases=3 Conn=Delta Model=1 kV=4.16 kW=1155 kvar=660
daily=PerfilCargas
New Load.634a Bus1=634.1 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=0.277 kW=150 kvar=110
daily=PerfilCargas
New Load.634b Bus1=634.2 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=0.277 kW=130 kvar=100
daily=PerfilCargas
New Load.634c Bus1=634.3 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=0.277 kW=100 kvar=70 daily=PerfilCargas
New Load.645 Bus1=645.2 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=170 kvar=125 daily=PerfilCargas
New Load.646 Bus1=646.2.3 Phases=1 Conn=Delta Model=2 kV=4.16 kW=230 kvar=132
daily=PerfilCargas
New Load.692 Bus1=692.3.1 Phases=1 Conn=Delta Model=5 kV=4.16 kW=170 kvar=151
daily=PerfilCargas
New Load.675a Bus1=675.1 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=485 kvar=190 daily=PerfilCargas
New Load.675b Bus1=675.2 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=68 kvar=60 daily=PerfilCargas
New Load.675c Bus1=675.3 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=290 kvar=212 daily=PerfilCargas
New Load.611 Bus1=611.3 Phases=1 Conn=Wye Model=5 kV=2.4 kW=170 kvar=80 daily=PerfilCargas
New Load.652 Bus1=652.1 Phases=1 Conn=Wye Model=2 kV=2.4 kW=128 kvar=86 daily=PerfilCargas
New Load.670a Bus1=670.1 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=17 kvar=10 daily=PerfilCargas
New Load.670b Bus1=670.2 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=66 kvar=38 daily=PerfilCargas
New Load.670c Bus1=670.3 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=117 kvar=68 daily=PerfilCargas
// Capacitores
New Capacitor.Cap1 Bus1=675 phases=3 kVAR=600 kV=4.16 enabled=N
New Capacitor.Cap2 Bus1=611.3 phases=1 kVAR=100 kV=2.4 enabled=N
// Linhas
New Line.650632 Phases=3 Bus1=RG60.1.2.3 Bus2=632.1.2.3 LineCode=mtx601 Length=2000 units=ft
New Line.632670 Phases=3 Bus1=632.1.2.3 Bus2=670.1.2.3 LineCode=mtx601 Length=667 units=ft
New Line.670671 Phases=3 Bus1=670.1.2.3 Bus2=671.1.2.3 LineCode=mtx601 Length=1333 units=ft
New Line.671680 Phases=3 Bus1=671.1.2.3 Bus2=680.1.2.3 LineCode=mtx601 Length=1000 units=ft
New Line.632633 Phases=3 Bus1=632.1.2.3 Bus2=633.1.2.3 LineCode=mtx602 Length=500 units=ft
New Line.632645 Phases=2 Bus1=632.3.2 Bus2=645.3.2 LineCode=mtx603 Length=500 units=ft
New Line.645646 Phases=2 Bus1=645.3.2 Bus2=646.3.2 LineCode=mtx603 Length=300 units=ft
New Line.692675 Phases=3 Bus1=692.1.2.3 Bus2=675.1.2.3 LineCode=mtx606 Length=500 units=ft
New Line.671684 Phases=2 Bus1=671.1.3 Bus2=684.1.3 LineCode=mtx604 Length=300 units=ft
New Line.684611 Phases=1 Bus1=684.3 Bus2=611.3 LineCode=mtx605 Length=300 units=ft
New Line.684652 Phases=1 Bus1=684.1 Bus2=652.1 LineCode=mtx607 Length=800 units=ft
// Chave fechada
New Line.671692 Phases=3 Bus1=671 Bus2=692 Switch=y r1=1e-4 r0=1e-4 x1=0.000 x0=0.000
c1=0.000 c0=0.000
// Perfis de Cargas VEs
New Loadshape.LoadshapeVE_1 npts=576 interval=0.0833333333333333 mult=(0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

```



```
New Storage.VE_34 phases=1 Bus1=634.3 kv=0.277 kwrated=6.60 kwhrated=44.9 %stored=10
dispmode=follow daily=LoadshapeVE_19
New Storage.VE_35 phases=1 Bus1=634.3 kv=0.277 kwrated=6.60 kwhrated=44.9 %stored=10
dispmode=follow daily=LoadshapeVE_20
// Parâmetros Simulacao
set mode = daily
set stepsize = 5m
set number = 576
set hour = 0
Set Voltagebases=[115, 4.16, .48 , .277]
CalcVoltageBases
Set Controlmode=off
// TAPs fixos
Transformer.Reg1.Taps=[1.0 1.00625]
Transformer.Reg2.Taps=[1.0 1.00625]
Transformer.Reg3.Taps=[1.0 1.00625]
calcv
Solve
```