

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VÍTOR YURI KASPER LEAL

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO PERFIL
DE TENSÃO DE UM SISTEMA-TESTE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

MEDIANEIRA

2025

VÍTOR YURI KASPER LEAL

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO PERFIL
DE TENSÃO DE UM SISTEMA-TESTE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

**Analysis of the effects of electric vehicle integration on the voltage profile of a
test power transmission system**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Cristiane Lionço de Oliveira.

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VÍTOR YURI KASPER LEAL

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO PERFIL
DE TENSÃO DE UM SISTEMA-TESTE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/fevereiro/2025

Cristiane Lionço de Oliveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rubisson Duarte Lamperti
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hugo Andres Ruiz Florez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

RESUMO

Por serem elementos que consomem uma grande quantidade de carga, a introdução de veículos elétricos em um sistema de transmissão de energia elétrica pode gerar desafios operacionais significativos para os operadores do sistema. Isso inclui um aumento nas perdas nas linhas de transmissão, uma piora no perfil de tensão e perturbações nos ângulos das tensões das barras. Visto isso, este trabalho tem como objetivo geral analisar o efeito da inserção de veículos elétricos no perfil de tensão de um sistema-teste de transmissão de energia elétrica de 14 barras, através da implementação do método de Newton-Raphson desenvolvido na linguagem computacional C. Para este fim, foram investigados os efeitos de 8 cenários de uso de veículos elétricos conectados ao sistema-teste: 1. O sistema em sua condição inicial (caso base). 2. O sistema com 500 veículos conectados simultaneamente em cada barra de carga. 3. O sistema com 1000 veículos conectados simultaneamente em cada barra de carga. 4. O sistema com 2000 veículos conectados simultaneamente em cada barra de carga. 5. O sistema em horário de pico (aumento de 50% no consumo de potência ativa e reativa nas barras de carga). 6. O sistema em horário de pico com 500 veículos conectados simultaneamente em cada barra de carga. 7. O sistema em horário de pico com 1000 veículos conectados simultaneamente em cada barra de carga. 8. O sistema em horário de pico com 2000 veículos conectados simultaneamente em cada barra de carga. Para representar o consumo adicional de potência dos veículos elétricos, foi considerado que cada veículo conectado à rede consome 7kW, sendo este valor a potência média de um carregador semi-rápido. Os resultados do perfil de tensão e das perdas nas linhas de transmissão dos casos sem veículos elétricos conectados no sistema-teste (Casos 1 e 5) foram utilizados como referência para comparação com os cenários com veículos elétricos. e todos os cenários foram validados através do programa ANAREDE. Os casos 1, 2, 3 e 4 foram comparados entre si, bem como os casos 5, 6, 7 e 8. Ao analisar os resultados e comparar o cenário 1 com os cenários 2, 3 e 4, bem como o cenário 5 com os cenários 6, 7 e 8, observou-se uma redução na tensão das barras PQ do sistema, diminuição no valor do ângulo da tensão nas barras de geração e carga, e um aumento geral nas perdas ativas das linhas à medida que a quantidade de veículos na rede aumentou. O aumento da carga nessas barras elevou a corrente nas linhas, resultando em acréscimo das perdas. Consequentemente, a tensão em cada barra de carga sofreu redução e defasagem. Isso evidencia a necessidade de adotar medidas para mitigar os efeitos do aumento de carga causado por veículos elétricos nas redes de transmissão de energia elétrica.

Palavras-chave: algoritmos computacionais; energia elétrica - transmissão; Automóveis elétricos.

ABSTRACT

Due to their high energy consumption, the introduction of electric vehicles into an electrical transmission system can present significant operational challenges for system operators. These challenges include increased transmission line losses, worsened voltage profiles, and disturbances in bus voltage angles. Consequently, this study aims to analyze the impact of electric vehicle integration on the voltage profile of a 14-bus test transmission system, using the Newton-Raphson method implemented in the C programming language. To achieve this, the effects of 8 scenarios of electric vehicle usage connected to the test system were investigated: 1. The system in its initial condition (base case). 2. The system with 500 vehicles simultaneously connected at each load bus. 3. The system with 1000 vehicles simultaneously connected at each load bus. 4. The system with 2000 vehicles simultaneously connected at each load bus. 5. The system during peak hours (50% increase in active and reactive power consumption at load buses). 6. The system during peak hours with 500 vehicles simultaneously connected at each load bus. 7. The system during peak hours with 1000 vehicles simultaneously connected at each load bus. 8. The system during peak hours with 2000 vehicles simultaneously connected at each load bus. To represent the additional power consumption of electric vehicles, each vehicle connected to the network was considered to consume 7kW, which is the average power of a semi-fast charger. The voltage profile and transmission line loss results from the cases without electric vehicles connected to the test system (Cases 1 and 5) were used as a reference for comparison with the scenarios involving electric vehicles. All scenarios were validated using the ANAREDE program. Cases 1, 2, 3, and 4 were compared with each other, as well as cases 5, 6, 7, and 8. When analyzing the results and comparing scenario 1 with scenarios 2, 3, and 4, as well as scenario 5 with scenarios 6, 7, and 8, a reduction in the voltage of the system's PQ buses, a decrease in the voltage angle value at generation and load buses, and a general increase in active line losses were observed as the number of vehicles on the network increased. The increased load on these buses raised the currents in the lines, resulting in higher losses. Consequently, the voltage at each load bus experienced reduction and lag. This highlights the need to adopt measures to mitigate the effects of load increases caused by electric vehicles on electrical transmission networks.

Keywords: computational algorithms; electric power transmission; electric vehicles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico representando as perdas nas linhas para cada situação	18
Figura 2 - Resultados do caso um.....	19
Figura 3 - Resultados do caso dois	19
Figura 4 - Resultados do caso três.....	19
Figura 5 - Curva da carga ao longo do tempo sem nenhum VE conectado à rede ...	22
Figura 6 - Demonstração gráfica do uso do método de Newton-Raphson para encontrar a raiz de uma função.....	25
Figura 7 - Fluxograma para o algoritmo Newton-Raphson	29
Figura 8 - Sistema IEEE 14 barras	31
Figura 9 - Fluxograma da metodologia	33
Figura 10 - Comparação entre resultados das tensões das barras	36
Figura 11 - Comparação entre resultados dos ângulos das barras	37
Figura 12 - Relação de tensão das barras em horário fora de pico	38
Figura 13 - Relação do ângulo das barras em horário fora de pico	38
Figura 14 - Perdas ativas totais na rede em horário fora de pico	39
Figura 15 - Relação de tensão das barras em horário de pico	40
Figura 16 - Relação do ângulo das barras em horário de pico.....	41
Figura 17 - Perdas ativas totais na rede no horário de pico	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência necessária para a alimentação de VEs para diferentes taxas de adoção.....	21
Tabela 2 - Aumento relativo da corrente e potência ativa na barra para um carregamento distribuído ao longo do mês.....	23
Tabela 3 - Aumento relativo da corrente e potência ativa na barra para um carregamento concentrado em um único dia.....	24
Tabela 4 - Consumo de potência em relação ao aumento de veículos elétricos no sistema.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivos específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Veículos elétricos	14
3.2	O problema do fluxo de potência	15
3.3	A implementação de veículos elétricos em sistemas-teste	16
3.4	Newton-Raphson	25
4	METODOLOGIA	28
4.1	Tipo da pesquisa	28
4.2	A aplicação do método de Newton-Raphson para a solução do problema do fluxo de potência	28
4.3	A linguagem C	30
4.4	Método da eliminação de Gauss-Jordan	31
4.5	Materiais em estudo	31
4.6	Métodos	32
4.6.1	Caso 1 - Horário fora de pico.....	35
4.6.2	Caso 2 - Horário fora de pico com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.....	35
4.6.3	Caso 3 - Horário fora de pico com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.....	35
4.6.4	Caso 4 - Horário fora de pico com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.....	35
4.6.5	Caso 5 - Horário de pico.....	35
4.6.6	Caso 6 - Horário de pico com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.....	36
4.6.7	Caso 6 - Horário de pico com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.....	36
4.6.8	Caso 6 - Horário de pico com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga	36
4.7	Tratamento dos dados	36
5	RESULTADOS	37
5.1	Caso base	37
5.2	Sistema em horário fora de pico	38
5.3	Sistema em horário de pico	40

6	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Veículos motorizados são uma parte integral da nossa economia, sendo essenciais para o transporte de matéria-prima, materiais, produtos e até mesmo funcionários (FACHIN, 2016). No entanto, a dependência desse setor de transporte resulta em uma significativa emissão de gases de efeito estufa, especialmente na América Latina, onde o transporte rodoviário contribui com 92% dessas emissões. Essa poluição não apenas prejudica o meio ambiente, mas também representa um risco à saúde pública, agravando condições respiratórias e pulmonares. (LOPES TOLEDO; LÈBRE LA ROVERE, 2018, 3995)

Levando isso em consideração, é essencial que seja analisada a possibilidade da integração de Veículos Elétricos (VEs) à frota de transporte. VEs podem ser completamente movidos por eletricidade ou apenas parcialmente, fazendo uso de um motor térmico em conjunto com o elétrico. Estes últimos são chamados de Veículos Elétricos Híbridos (VEHs), e sua configuração de motores pode ser em série, paralelo ou uma combinação dos dois. (CAPATA, 2018)

As baterias utilizadas nesses carros são compostas por íons de lítio, níquel-hidretos metálicos ou chumbo. No entanto, nos últimos anos baterias de chumbo tem sido gradualmente eliminadas, devido a sua toxicidade, tamanho, peso, e baixa velocidade de recarga. Como a energia elétrica pode ser obtida de forma limpa, o uso de VEs pode amenizar a degradação ambiental causada pelo setor de transporte. (CAPATA, 2018)

Além dos benefícios ambientais, a possível economia financeira resultante do desuso de combustíveis fósseis os tornam uma opção atraente para o consumidor moderno. Esses fatos contribuíram para um rápido crescimento na frota de veículos elétricos. No Brasil, houve uma ampliação de 787% na frota de veículos elétricos entre os anos de 2019 e 2023, atribuído em parte à redução de suas alíquotas tributárias (SALIM, 2024).

Essa adoção adicional não se aplica somente a população geral, mas também a entidades governamentais. Em 2023, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) realizou um estudo para averiguar a possibilidade de substituir pelo menos 20% de sua frota por carros elétricos e híbridos até 2025 (ASSESSORIA ESPECIAL DE COMUNICAÇÃO, 2023), demonstrando que esta tendência pode ser observada em todos os estratos da sociedade.

Os dados nacionais refletem a situação global. A Agência Internacional de Energia, em seu relatório “Perspectivas Globais para Veículos Elétricos”, estimou que a porcentagem de veículos elétricos vendidos na China, União Européia e Estados Unidos em 2024 seriam, respectivamente, 45%, 25% e 11% das vendas totais. O mesmo documento projetou que metade dos veículos vendidos globalmente serão elétricos até 2035 (CARDOSO, 2024). Entretanto, para que a transição de combustíveis fósseis para energia limpa seja completamente benéfica, é necessário considerar os efeitos desta carga adicional no sistema de potência.

O sistema de transmissão de energia elétrica (STEE) atua como um elo intermediário entre a geração e a distribuição de energia. Este sistema opera com tensões elevadas para reduzir a corrente nas linhas e, conseqüentemente, minimizar as perdas de potência. Ele é composto por linhas de transmissão, torres, subestações, isoladores e outros elementos de estrutura e proteção (OLIVEIRA et al., 2021). A incorporação de veículos elétricos ao STEE pode necessitar aprimoramentos na infraestrutura e na gestão da rede.

Primeiramente, a recarga de veículos elétricos resulta em uma maior carga na rede, algo que também leva a um aumento nas perdas na linha e um pior perfil de tensão para as barras do sistema. Outro ponto a ser considerado é que, para o habitante padrão, o horário mais conveniente para a recarga consiste no horário de pico. Um aumento desregulado no consumo da carga neste horário pode forçar as distribuidoras a superdimensionar o sistema elétrico, um custo que seria então repassado ao consumidor final. (FERREIRA; SILVA; ALMEIDA, 2024, p. 32-33)

Uma das soluções oferecidas para este problema seria o investimento em infraestruturas públicas para recarga. As baterias de veículos elétricos podem levar cerca de 6 horas para serem completamente abastecidas, mas sistemas específicos podem reduzir esse tempo para cerca de uma hora (BOÇON, 2019). Equipamentos de recarga podem ser distribuídos ao longo de rodovias, ou em locais de alta movimentação como o estacionamento de centros comerciais. Isso ofereceria uma alternativa de abastecimento aos motoristas, reduzindo a necessidade do uso do sistema residencial para a recarga.

Outro recurso seria uma mudança no modelo de tarifação. A tarifa branca é uma forma de cobrança que leva em consideração o horário de utilização da rede pelo consumidor. Nesta modalidade, o consumo de energia no horário de ponta (18h até as 21h) leva um aumento de 80,6% ao preço, enquanto o consumo no horário

intermediário (das 17h às 18h e das 21h às 22h) sofre um aumento de 16,9%. Em contrapartida, o consumo no horário fora de ponta (22h até as 17h) receberia um desconto de 14,5% (BOÇON, 2019). Isso estimularia o consumidor a mover o seu consumo para um horário de menor uso.

De qualquer forma, é evidente que o STEE brasileiro enfrentará desafios inéditos em um futuro não tão distante. Tomados holisticamente, esses fatos demonstram a necessidade de estudos relacionados ao impacto desses novos recursos em sistemas de potência.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da inserção de veículos elétricos no perfil de tensão de um sistema-teste de 14 barras de transmissão de energia elétrica.

2.1 Objetivos específicos

- Revisar conceitos teóricos sobre fluxo de potência e métodos numéricos aplicáveis à sua resolução.
- Desenvolver um programa em linguagem C para resolver o problema de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson.
- Validar os resultados do sistema-teste de 14 barras por meio de comparações com o software ANAREDE.
 - Simular os seguintes casos:
 1. O sistema em seu caso base.
 2. O sistema com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.
 3. O sistema com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.
 4. O sistema com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.
- Realizar comparações entre os módulos e ângulos das tensões de cada barra e das perdas nas linhas para os casos 1, 2, 3 e 4.
- Simular os seguintes casos:
 5. O sistema em horário de pico.
 6. O sistema em horário de pico com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.
 7. O sistema em horário de pico com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.
 8. O sistema em horário de pico com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga.
- Realizar comparações entre os módulos e ângulos das tensões de cada barra e das perdas nas linhas para os casos 5, 6, 7 e 8.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, foram descritos os conceitos teóricos necessários para o entendimento deste trabalho. Também foram abordadas as ferramentas numéricas e computacionais utilizadas neste estudo.

3.1 Veículos elétricos

A dependência de combustíveis fósseis para a mobilidade urbana cria diversos problemas a um nível nacional. Esses combustíveis liberam grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, intensificando o efeito estufa. Além disso, graças a sua disponibilidade limitada e sua distribuição irregular ao longo do planeta, o seu uso desmedido torna a economia nacional vulnerável a instabilidades geopolíticas. (IEA; 2022)

Também é importante reconhecer os impactos na saúde pública: a doença pulmonar obstrutiva crônica e as infecções das vias respiratórias inferiores, ambas condições exacerbadas pela poluição produzida por motores a combustão, constituem a terceira e a quarta causas de morte mais comuns do mundo (BARASSA, CRUZ e MORAES; 2022). Visto isso, os veículos elétricos (VEs) tornam-se uma alternativa interessante para os métodos de transporte tradicionais.

O termo veículo elétrico pode se referir a qualquer automóvel que utiliza a energia elétrica em sua propulsão. Por conta disso, ele é utilizado para se referir a várias tecnologias distintas, sendo estas geralmente classificadas em relação à sua fonte de energia e a presença de um motor de combustão em sua construção. Seguindo esta catalogação, os VEs podem ser separados em quatro tipos (WADY, 2021):

- Veículos Elétricos Híbridos: Utilizam dois motores, um a combustão e um elétrico, para se movimentarem. Ambos atuam simultaneamente, aumentando a sua eficiência energética. Eles podem utilizar a energia dissipada na frenagem para alimentar o motor elétrico.
- Veículos Elétricos Híbridos Plug-in: Possuem dois motores, assim como os veículos híbridos convencionais. No entanto, o motor a combustão é apenas

utilizado quando o banco de baterias que alimenta o motor está descarregado. A bateria é recarregada através de um *plug* conectado à rede de energia.

- Veículos Elétricos a Bateria: Veículo completamente elétrico. Eles são alimentados exclusivamente por baterias abastecidas por carregadores elétricos. Podem também fazer uso da frenagem regenerativa, assim como veículos híbridos.
- Veículos Elétricos a Célula de Combustível: Faz uso do gás hidrogênio para alimentar seu motor. A eletricidade é gerada a partir de uma célula combustível que combina hidrogênio e oxigênio, resultando na produção de água como subproduto da geração de energia.

Segundo RAMOS (2022), o funcionamento adequado de um VE depende também de um conversor, responsável por controlar a velocidade do motor através da modulação da intensidade da corrente que flui sobre ele.

Em relação às baterias, existem no momento três tipos que podem ser encontradas nos veículos disponíveis comercialmente: baterias de íon-lítio, de níquel-hidretos metálicos e de chumbo-ácido, com as baterias de lítio sendo as mais utilizadas atualmente. Novas tecnologias continuam a ser estudadas, com o intuito de aumentar a densidade de carga e a vida útil das baterias elétricas. Nesse contexto, baterias de lítio-ar e de estado sólido se mostram como alternativas promissoras para o futuro dos VEs. (CAPATA, 2018)

3.2 O problema do fluxo de potência

O fluxo de potência é uma ferramenta que permite analisar o estado operativo de um sistema elétrico (DELMASQUIO, 2022). Ele consiste na determinação das potências ativas e reativas que fluem pelas linhas e das tensões complexas de cada barra. Para esta análise, são ignoradas as variações ao longo do tempo, ou seja, estudamos um modelo estático da rede (MONTICELLI e GARCIA, 2003).

De acordo com CECHINEL (2023), cada barra possui quatro variáveis relacionadas à mesma, sendo estas a potência ativa, a potência reativa, o módulo da tensão e o ângulo da tensão. As barras são então classificadas de acordo com as variáveis fornecidas pelo problema, sendo divididas em três tipos:

- Barras PQ: Barras de carga. As potências são conhecidas, mas a tensão é uma incógnita.
- Barras PV: Barra de geração. É fornecido o módulo da tensão e a potência ativa gerada, mas a potência reativa e o ângulo da tensão são desconhecidos.
- Barra Slack: Também conhecida como barra de referência. Existe apenas uma no sistema. Convencionada como tendo uma tensão de 1 pu, com ângulo de 0 rad. Ela proporciona uma referência para a magnitude da tensão e permite fechar o balanço de potência. Sem ela, o sistema não pode ser resolvido. (CECHINEL, 2023)

Para obter a resolução do fluxo de carga é necessário utilizar os valores conhecidos do problema para resolver as equações de cada barra, achando então as incógnitas. Por conta da solução fazer uso de métodos iterativos, a exatidão dos resultados depende da tolerância especificada (OLIVEIRA, 2017).

3.3 A implementação de veículos elétricos em sistemas-teste

Veículos elétricos podem interagir com um sistema elétrico de diferentes formas. Por conta de sua energia não ser sempre completamente utilizada durante sua operação convencional, a carga remanescente em sua bateria pode ser utilizada para alimentar a rede. Isso torna os VEs elementos ativos, que podem tanto absorver quanto fornecer potência à rede. Esses diferentes modos de operação são nomeados, respectivamente, de G2V (Grid to Vehicle) e V2G (Vehicle to Grid) (BATISTA, ESCOBAR DE OLIVEIRA; 2020).

Apesar da legislação brasileira não permitir que VEs insiram potência no sistema, artigos que estudam essa possibilidade já foram publicados. Os estudos de BATISTA e ESCOBAR DE OLIVEIRA (2020) servem como exemplo deste tipo de análise. Entretanto, mesmo com VEs suprindo a rede, o aumento da carga em um sistema de potência causado pela recargas de baterias tende a aumentar as perdas nas linhas e piorar o perfil de tensão das barras.

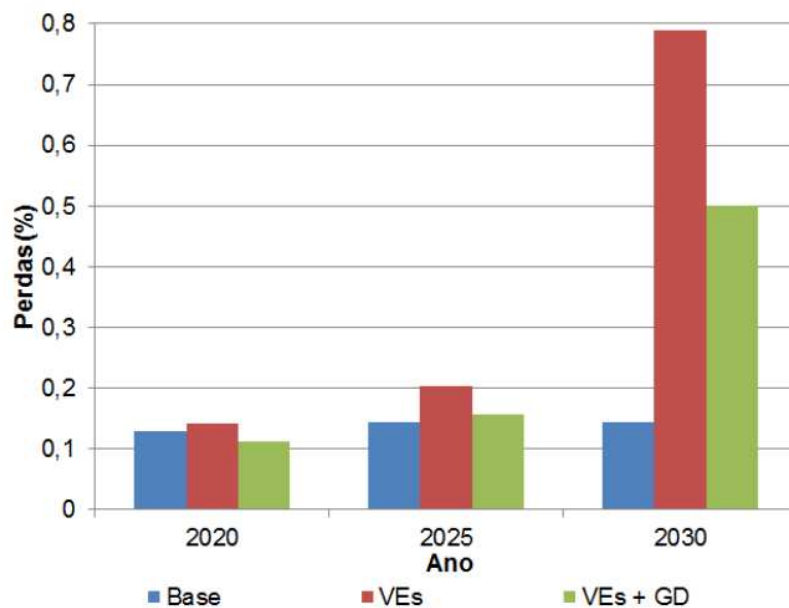
As simulações de PIOTROWSKI et al. (2021) demonstram este fenômeno. Nesta análise, os autores utilizaram projeções no aumento da frota de VEs para examinar o impacto da adição destes em um sistema de 1043 barras durante o

período de uma década, começando a partir do ano de 2020. Foram projetados três casos:

- Cenário 1: Representa a previsão de carga sem a inserção de veículos elétricos, aumentando 4% a cada ano. Serve como caso base de comparação.
- Cenário 2: O mesmo sistema do caso base, mas com a inserção de VEs distribuídos ao longo das barras de forma aleatória. Para este caso, foi adotado o carregamento de baterias do tipo “vale”, que é caracterizado por uma recarga desregulada, ocorrendo geralmente a partir das dez horas.
- Cenário 3: Similar ao caso 2, mas com a inserção de geração distribuída (GD) por placas solares. Neste cenário, buscou-se amenizar o efeito da recarga de baterias no sistema, realizando-as durante o período de maior geração de energia fotovoltaica.

A Figura 1 demonstra os resultados das perdas nas linhas para o cenário 1 (base), 2 (veículos elétricos) e 3 (veículos elétricos com a adição de geração distribuída) nos anos 2020, 2025 e 2030. Para o ano de 2020, as perdas entre os três cenários foram próximas, sendo menores no cenário 3. No ano de 2025 as perdas nas linhas ocasionadas pela adição de VEs no sistema aumentam, de forma que o cenário 1 possui a menor quantidade de perdas. Finalmente, no ano de 2030, as perdas nos cenários 2 e 3 aumentam de forma drástica, mesmo com a adição da geração distribuída no cenário 3. A diminuição das perdas pela adição da geração distribuída ocorreu porque a energia está sendo fornecida diretamente das residências aos veículos elétricos, reduzindo a corrente que circula nas linhas de transmissão e, conseqüentemente, suas perdas totais.

Figura 1 - Gráfico das perdas nas linhas para os cenários 1, 2 e 3 nos anos 2020, 2025 e 2030



Fonte: Piotrowski et al. (2021)

Observando-se os resultados, os cenários 2 e 3 demonstraram perdas nas linhas muito superiores à do caso base. Ademais, cerca de 45% dos transformadores do cenário 2 e 35% dos transformadores do caso 3 apresentaram sobrecargas. As sobrecargas nas linhas, entretanto, apresentaram resultados mais promissores: mais de 35% das linhas de BT do caso 2 chegaram a sobrecarga, mas com a adição de GD esse número caiu para menos de 15%.

A elevada quantidade de perdas e a sobrecarga dos transformadores na rede, causadas pelas altas taxas de veículos elétricos, mostram que um sistema de potência planejando incorporar a mobilidade elétrica em grande escala deve ser dimensionado levando isso em consideração. Entretanto, o uso de outras tecnologias, como a geração distribuída, pode amenizar os impactos negativos na rede.

Além da adição de geração distribuída, outra estratégia que pode melhorar a integração de veículos elétricos no sistema é o carregamento dos veículos no horário apropriado. Essa ideia é analisada nos estudos realizados por Batista e Escobar de Oliveira (2020). Neste artigo, os autores utilizam o software OpenDSS para simular três casos onde os veículos elétricos são conectados a um sistema de potência de 35 barras:

- Caso 1: Os veículos foram conectados a rede no formato G2V durante o período das 19h até as 23h

Figura 2 - Resultados do caso um

INFORMAÇÕES	CASO BASE	CASO UM
Tensão máxima (pu)	0,99996	0,99984
Tensão mínima (pu)	0,80835	0,11337
Potência ativa total (kW)	917,648	3299,15
Potência reativa total (kvar)	452,115	3216,91
Perdas ativas totais (kW)	40,9823	1182,32
Perdas reativas totais (kvar)	27,524	2959,25

Fonte: Batista e Escobar de Oliveira (2020)

- Caso 2: Os veículos foram conectados à rede no formato G2V durante o período das 19h até as 23h e no formato V2G durante o período das 00h até as 6h, fornecendo 60% de sua carga total para a rede.

Figura 3 - Resultados do caso dois

INFORMAÇÕES	CASO BASE	CASO DOIS
Tensão máxima (pu)	0,99996	0,99982
Tensão mínima (pu)	0,80835	0,10855
Potência ativa total (kW)	917,648	3696,02
Potência reativa total (kvar)	452,115	3743,69
Perdas ativas totais (kW)	40,9823	1405,4
Perdas reativas totais (kvar)	27,524	3508,78

Fonte: Batista e Escobar de Oliveira (2020)

- Caso 3: Os veículos foram conectados à rede no formato G2V durante o período das 00h até as 6h e no formato V2G durante o período das 18h até as 22h, fornecendo 60% de sua carga total para a rede.

Figura 4 - Resultados do caso três

INFORMAÇÕES	CASO BASE	CASO TRÊS
Tensão máxima (pu)	0,99996	0,99995
Tensão mínima (pu)	0,80835	0,7966
Potência ativa total (kW)	917,648	1031,68
Potência reativa total (kvar)	452,115	468,026
Perdas ativas totais (kW)	40,9823	48,2274
Perdas reativas totais (kvar)	27,524	46,0282

Fonte: (Batista e Escobar de Oliveira (2020)

O caso 3 demonstra a maior eficiência, pois os VEs estão amenizando o consumo de suas barras durante o horário de pico e sendo abastecidos durante um horário de pouca demanda. É interessante verificar que, apesar do caso 2 alimentar a rede no período da madrugada, suas perdas totais são superiores às do caso 1, que

não alimenta a rede em nenhum ponto. Os autores notam que alimentar a rede em um horário de baixo consumo acarreta consequências negativas para a mesma, pois produz um excesso de potência reativa que pode resultar na interrupção do fornecimento de energia em horários de pico.

Em sua conclusão, os autores apontam que seria necessário ação privada ou governamental para estimular o uso apropriado de VEs no sistema de distribuição. No momento, os consumidores não pagam um adicional baseado no horário de uso. Isso significa que, sem pontos de abastecimento públicos, os usuários de VEs estariam estimulados a carregá-los durante o horário de pico, assim que chegam do trabalho.

O estudo de CAMARGO (2022) compara o impacto econômico do VE com o de um veículo a combustão equivalente, além de analisar os possíveis impactos da inserção de veículos elétricos em um sistema de geração fotovoltaico. O automóvel utilizado nesta pesquisa foi o Renault Zoe E-Tech Zen, um carro elétrico com potência de 135 cv e bateria de 52 kWh. Para a comparação financeira o autor utilizou o Renault Sandero S Edition, por possuir características similares ao Renault Zoe.

Além das despesas em relação ao combustível, foram ponderados outros aspectos pecuniários dos veículos, incluindo os custos de manutenção e o preço do seguro. Também foi levado em consideração a isenção de IPVA para veículos elétricos, permitindo então um cotejo da viabilidade econômica de um carro elétrico ao longo do período de uma década. Foi considerada uma quilometragem de 10000 km por ano e o seguro mais barato disponível para cada automóvel, observando uma depreciação anual de 7,95% para ambos.

Apesar dos custos relativos ao combustível e aos impostos serem inferiores no VE comparado ao veículo tradicional, o maior dispêndio inicial combinado com o valor do seguro mais elevado resultou no Renault Zoe custando um total de R\$299.950,89 no período de 10 anos. Isso é R\$107.767,00 a mais do que o Renault Sandero, indicando que a mobilidade elétrica deve ser entendida como um investimento a longo prazo para o brasileiro médio.

Para a análise da integração de VEs em um sistema fotovoltaico conectado à rede, foi utilizada a planta piloto localizada na UTFPR Campus Curitiba Sede Neville. Este sistema dispõe de dois carports, cada um proporcionando uma recarga de até 7 kWh. Foi considerada a mesma quilometragem média do ensaio anterior, de 10000 km ano ou 28 km por dia. Considerando o consumo de 0.13506 kWh/km para o

Renault ZOE, isso resulta em um uso de 3.78168 kWh por dia ou 113.45 kWh por mês.

O carport possui uma geração mensal de 459,81 kWh, o que permitiria para a bateria do Renault Zoe uma autonomia de até 3.404,48 km ao mês. Sendo isso mais que o suficiente para suprir a necessidade da situação teórica, CAMARGO então estima a consequência para o SEP caso VEs sejam adotados por uma parcela maior da população. Utilizando a frota curitibana de aproximadamente 1.100.000 veículos como base, o autor especula o possível consumo adicional de VEs para três diferentes níveis de adoção, conforme disposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Potência necessária para a alimentação de VEs para diferentes taxas de adoção de carros elétricos pela população de Curitiba

Taxa de adoção	Quantidade de Carports	Potência total
10%	27.140	12.479,5 MWh
15%	40.710,83	18.719,25 MWh
20%	54.281,1	24.959 MWh

Fonte: Camargo (2022)

Através desta análise, o autor conclui que apesar da existência de políticas públicas que incentivam a aquisição de veículos elétricos, o investimento nesta tecnologia ainda não é uma opção viável para a maior parte dos brasileiros. Algumas das sugestões para a mudança desse cenário incluem o desenvolvimento de baterias e carrocerias mais acessíveis, reduções nos custos de produção e a renovação da lei de isenção do IPVA.

O texto de BOÇON(2019) busca entender o efeito da introdução de veículos elétricos no sistema de potência do bairro do Jardim Botânico da cidade de Brasília, através de simulações pelo programa OpenDSS. Este é um software livre, que utiliza o método de Newton-Raphson para calcular o fluxo de potência de uma rede.

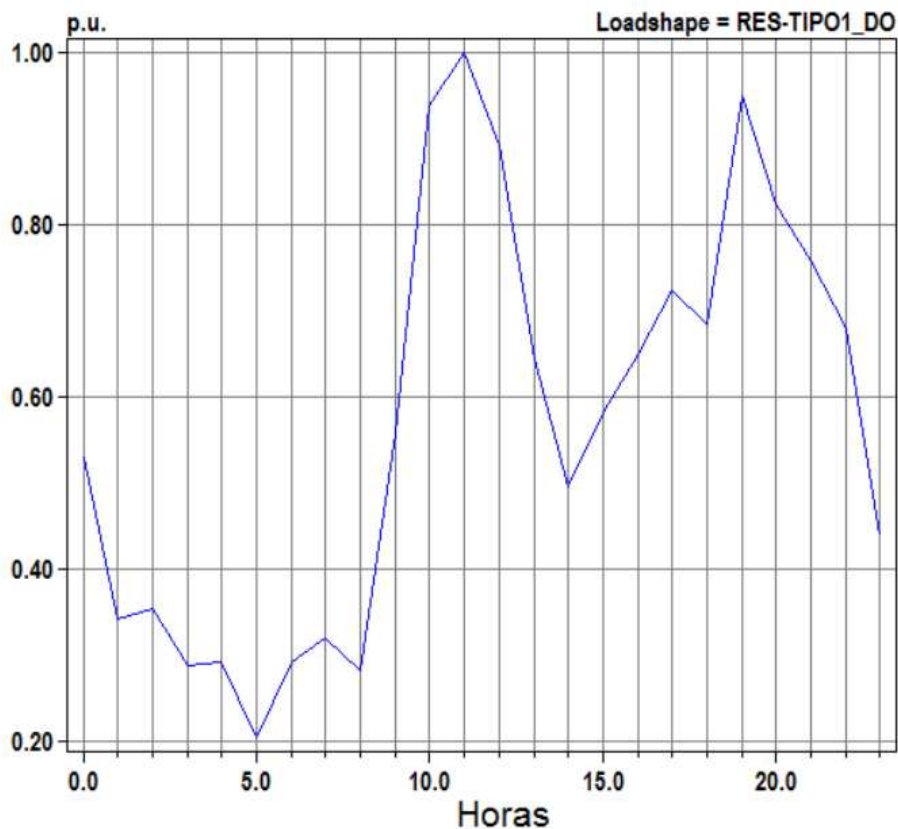
Primeiramente, o autor buscou entender o perfil do consumidor médio deste bairro. Analisando as cargas ligadas ao alimentador, ele consta que a potência média destas é cerca de 0,7kW ao mês, valor equivalente a aproximadamente 0,504 kWh de consumo. Seguindo a regulação de tarifa da CEB (Companhia Energética de

Brasília), ele determina que o consumidor médio se enquadra na tarifa mais cara da respectiva distribuidora. Com isso, o trabalho conclui que a adoção de um veículo elétrico representaria um aumento considerável na conta de energia do consumidor padrão.

Em seguida, ele estima a quantidade de carregamentos por consumidor. Considerando a distância do bairro até o centro da cidade e a autonomia dos veículos elétricos atualmente disponíveis no Brasil, é obtido o total de quatro recargas por mês. Após isso, o autor assume que será utilizado um carregador de 8 kW e uma bateria de 40kWh. Isto resulta em um consumo de 665 kWh por mês, ou 0,22 kW de aumento de demanda.

Com os dados obtidos pelo alimentador e os padrões estimados de uso de VEs, foi realizada a simulação do sistema em seu estado comum, onde nenhum VE constava na rede. O resultado foi uma tensão de máxima de 1.0405 pu e mínima de 1.0098 pu para o barramento, com uma corrente de 0.99 A e uma potência de 0,0232934 MW.

Figura 5 - Curva da carga ao longo do tempo sem nenhum VE conectado à rede



Fonte: Boçon (2019)

Com a utilização destes dados como referência, foram realizadas quatro simulações, cada uma considerando uma porcentagem distinta de penetração da tecnologia. Os valores analisados foram 5%, 15%, 30% e 50%. Para cada um deles ocorreu um aumento no valor da corrente e da potência ativa consumida pela barra, conforme descrito na Tabela 2. Vale notar que o último cenário foi o único no qual a tensão sofreu uma redução significativa, sendo esta de cerca de 0,7 volts.

Tabela 2 - Aumento relativo da corrente e potência ativa na barra para um carregamento distribuído ao longo do mês.

Penetração de VEs no sistema	Aumento na Corrente	Aumento na Potência Ativa
5%	2%	2%
15%	22%	44%
30%	40%	88%
50%	114%	256%

Fonte: Boçon (2019)

O autor também nota que, durante a escrita de seu trabalho, veículos elétricos representavam menos de 1% da frota automobilística brasileira. Considerando o quadro nacional, os casos três e quatro são extremamente otimistas. Mesmo assim, o sistema foi capaz de atender os requisitos em regime permanente do caso mais radical estudado.

Após isso, foram realizadas simulações estipulando que a carga da bateria seria realizada completamente em um único dia. Com essa cogitação, a potência média da barra para os dias de carregamento seria de 2.36 kW, considerando o consumo adicional de 40 kWh. Os resultados dessa conjectura se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 - Aumento relativo da corrente e potência ativa na barra para um carregamento concentrado em um único dia

Penetração de VEs no sistema	Aumento na Corrente	Aumento na Potência Ativa
5%	46%	113%
15%	174%	190%
30%	335%	620%
50%	627%	1586%

Fonte: Boçon (2019)

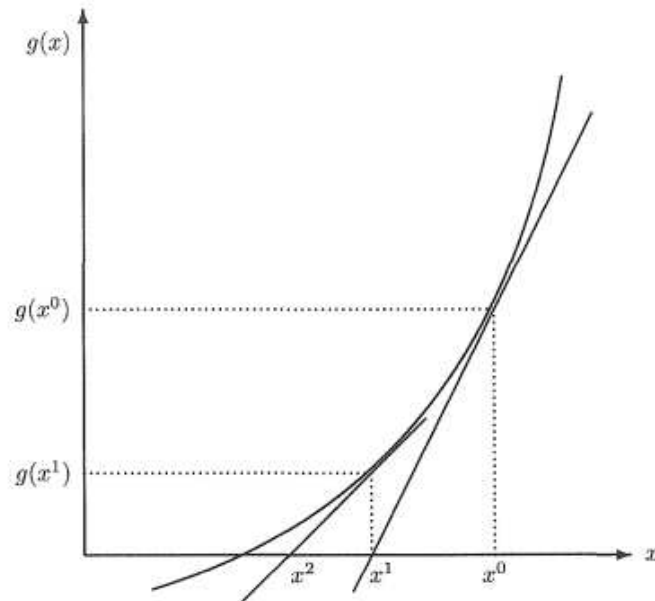
É possível observar que, seguindo uma distribuição apropriada das cargas, o sistema pode suportar uma grande quantidade de veículos. No entanto, caso as recargas sejam realizadas simultaneamente, é possível que o perfil de tensão da barra sofra alterações insustentáveis. Isso nos informa que a solução para o problema do aumento de carga deve ser elaborada seguindo com um paradigma comunitário, e não apenas individual.

3.4 Newton-Raphson

Newton-Raphson é um método iterativo que utiliza aproximações para encontrar o ponto onde uma função $g(x)$ se anula (FEY, SOARES e PERDONCINI; 2019). Resumidamente, a técnica faz uso da derivada da função para obter uma versão linearizada da mesma. Com essa linearização, é possível comparar o valor obtido em $g'(x)$ com o valor desejado em $g(x)$, e através de equacionamentos calcular o ajuste a ser feito na estimativa para obter um resultado mais próximo do requerido. Este processo pode então ser repetido até que a solução atenda à tolerância desejada (MONTICELLI e GARCIA, 2003).

Na Figura 6, é possível observar o método de Newton-Raphson sendo aplicado em uma função $g(x)$. Primeiro, é realizado um chute inicial x^0 . Encontra-se então a reta tangente à função $g(x)$ no ponto $g(x^0)$, e considera-se como x^1 o ponto em que essa reta toca o eixo x . Uma nova iteração do método é então realizada com este valor. O processo continua até que o valor de $g(x^n)$ esteja próximo o suficiente de 0.

Figura 6 - Demonstração gráfica do uso do método de Newton-Raphson para encontrar a raiz de uma função



Fonte: Monticelli e Garcia (2003)

Em problemas de fluxo de potência são considerados sistemas com várias equações, necessitando então o uso de uma abordagem multidimensional. Adicionalmente, não se busca encontrar o valor de x para o qual $g(x)$ se anula, mas sim o valor que resulta na potência especificada pelo problema. Levando isso em consideração, é possível estabelecer as Equações (1) e (2):

$$x = \begin{cases} \theta_k & ; k \in [\text{barras PV}] \\ \theta_k & ; k \in [\text{barras PQ}] \\ V_k & ; k \in [\text{barras PQ}] \end{cases} \quad (1)$$

$$g(x) = \begin{cases} P_k^{exp} - P_k(x) & ; k \in [\text{barras PV}] \\ P_k^{exp} - P_k(x) & ; k \in [\text{barras PQ}] \\ Q_k^{exp} - Q_k(x) & ; k \in [\text{barras PQ}] \end{cases} \quad (2)$$

Outra propriedade do caso multidimensional para Newton-Raphson é que devemos calcular as derivadas de todas as funções $g(x)$, em relação a todas as variáveis x . Isso se dá na forma de uma matriz Jacobiana, que pode ser dividida em 4 submatrizes: H, N, M e L.

A submatriz H consiste nas derivadas parciais das potências ativas do sistema em relação ao ângulo, a submatriz N consiste nas derivadas parciais das potências ativas do sistema em relação a tensão, a submatriz M consiste nas derivadas parciais das potências reativas do sistema em relação ao ângulo e a submatriz L consiste nas derivadas parciais das potências reativas do sistema em relação a tensão. Estas submatrizes contém elementos não nulos Para formar a matriz Jacobiana, essas submatrizes são então dispostas conforme a Equação (3):

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para o cálculo dos mismatches é necessário inverter a matriz Jacobiana e multiplicá-la pela diferença entre os valores especificados e os valores calculados com a estimativa atual. Somando esses mismatches ao valor estimado das incógnitas é possível obter um valor mais próximo do desejado.

Além dos métodos aqui discutidos, o método de Newton-Raphson possui variações desenvolvidas especificamente para aumentar a sua eficiência como algoritmo. Um deles é o método desacoplado. Este método busca reduzir o número de derivadas a serem calculadas, desconsiderando as submatrizes N e M da jacobiana. Isso é possível por conta da potência ativa ser mais sensível a alterações no ângulo da tensão, enquanto a potência reativa é mais sensível a alterações em seu módulo.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreverá as características gerais desta pesquisa, além dos sistemas de potência a serem estudados, os parâmetros para cada simulação, os softwares utilizados para o desenvolvimento do programa

4.1 Tipo da pesquisa

Esta é uma pesquisa quantitativa, que fez uso do método de Newton-Raphson para analisar os efeitos de diferentes parâmetros no resultado de um problema de fluxo de potência, analisando um sistema de 14 barras.

4.2 A aplicação do método de Newton-Raphson para a solução do problema do fluxo de potência

Para a aplicação do método de Newton-Raphson através da linguagem C, é necessário convertê-lo para o formato de um algoritmo. Neste caso, é possível utilizar o algoritmo proposto por MONTICELLI e GARCIA (2003).

A primeira etapa consiste na inicialização das variáveis e na escolha de valores iniciais para V e θ . Para isso, foram adotados os valores 1 pu para as tensões desconhecidas e 0 rad para os ângulos desconhecidos, visto que barras geralmente operam próximas desses valores.

Após isso, são calculadas as potências ativas e reativas conhecidas, utilizando os valores atribuídos para tensão e ângulo. Esses valores são então utilizados para testar a convergência. Se o módulo de todos os valores for menor que a tolerância, o método se encerra. Caso contrário, o algoritmo continua.

Podemos então calcular as derivadas das potências ativas e reativas em relação às tensões e aos ângulos fazendo uso das Equações (4) até (11):

$$H_{km} = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (4)$$

$$H_{kk} = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \quad (5)$$

$$N_{km} = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (6)$$

$$N_{kk} = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \quad (7)$$

$$M_{km} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (8)$$

$$M_{kk} = P_k - (V_k^2 G_{kk}) \quad (9)$$

$$L_{km} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (10)$$

$$L_{kk} = V_k^{-1} (Q_k + V_k^2 B_{kk}) \quad (11)$$

As Equações (4) e (5) correspondem às derivadas das potências ativas em relação aos ângulos, as Equações (6) e (7) correspondem às derivadas das potências ativas em relação às tensões, as Equações (8) e (9) correspondem às derivadas das potências reativas em relação aos ângulos e as Equações (10) e (11) correspondem às derivadas das potências reativas em relação às tensões.

Essas equações possibilitam a geração da matriz Jacobiana. Através da sua inversão, é possível obter o ajuste a ser aplicado aos valores do ângulo e tensão. A partir disso, é necessário testar novamente a convergência. Se a convergência ocorreu, as variáveis são então utilizadas para calcular as incógnitas restantes. Caso o contrário, o algoritmo retorna para a etapa do cálculo das potências e realiza mais uma iteração.

Assim que o método convergir, será necessário fazer o cálculo dos valores restantes. Para isso, serão utilizadas as Equações 12 e 13, que representam o fluxo de potência nas linhas, e as Equações 14 e 15, que representam as perdas em cada linha.

$$P_{km} = V_m^2 G_{km} - V_k V_m G_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m B_{km} \sin \theta_{km} \quad (12)$$

$$Q_{km} = -V_m^2 (B_{km}^{sh} + B_{km}) + V_k V_m G_{km} \sin \theta_{km} + V_k V_m B_{km} \cos \theta_{km} \quad (13)$$

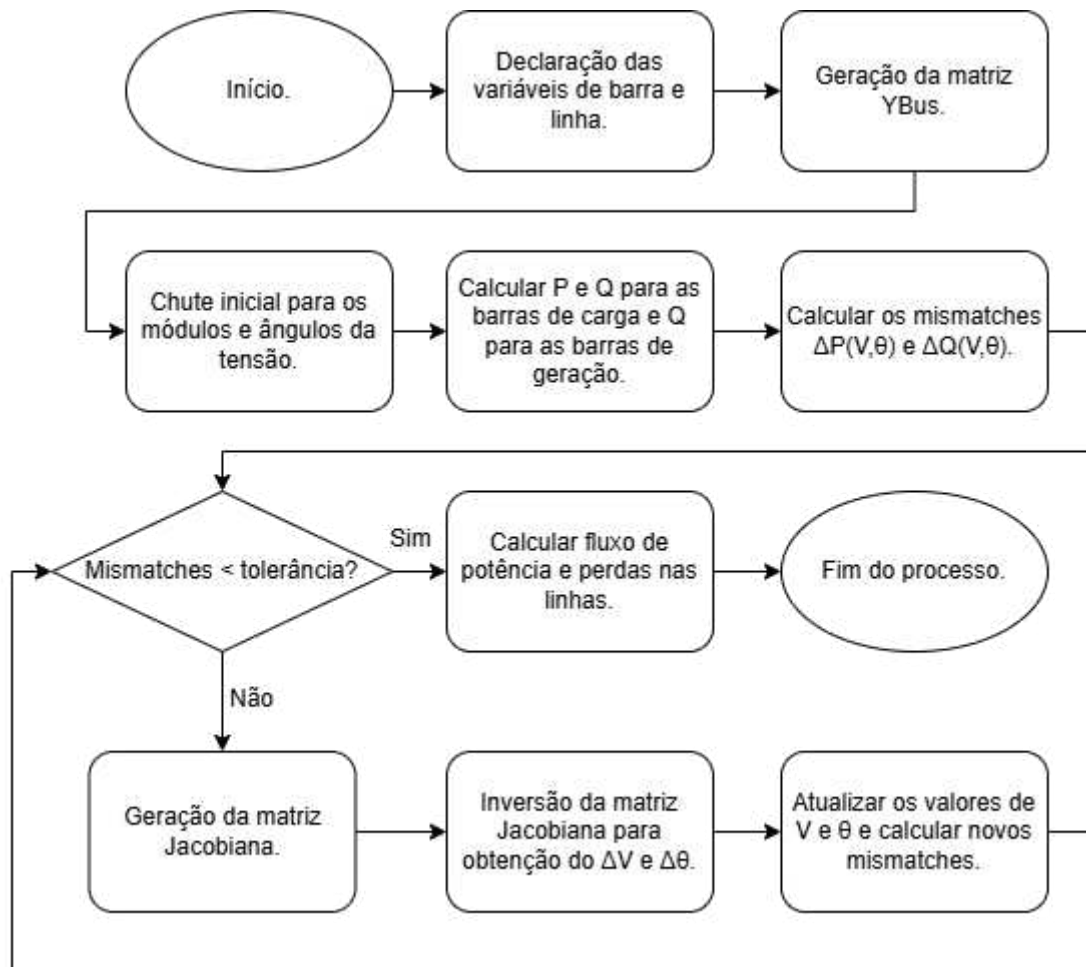
$$P_{km} + P_{mk} = G_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (14)$$

$$Q_{km} + Q_{mk} = -(V_k^2 + V_m^2) B_{km}^{sh} - B_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (15)$$

A Figura 7 ilustra a execução do algoritmo para resolver o problema, utilizado no desenvolvimento do código. O primeiro passo é declarar as variáveis do problema. Em seguida, essas variáveis são usadas para gerar a matriz YBus. Com os valores de admitância do sistema, realiza-se o chute inicial para V e θ . Posteriormente, calculam-se os valores de P e Q para as barras de carga, e de Q para as barras de geração. Se os mismatches ΔP e ΔQ forem menores que a tolerância, os valores de tensão são usados para calcular o fluxo de potência e as perdas nas linhas,

encerrando o método. Caso contrário, gera-se a matriz Jacobiana, que é invertida para encontrar novos valores de V e θ para a próxima iteração.

Figura 7 - Fluxograma para o algoritmo Newton-Raphson.



Fonte: Autoria própria (2024)

4.3 A linguagem C

A linguagem C foi desenvolvida pelo programador Dennis Ritchie em 1972, nos Bell Telephone Laboratories, com o objetivo de evitar a programação em Assembly. Durante a década de 70, ela se disseminou pelas universidades Estadunidenses, se tornando uma das linguagens mais populares do mundo. Seu nome se dá pelo fato de ter sido desenvolvida como uma evolução da linguagem B. (DAMAS, 2006)

Ao contrário de outras linguagens da época, C não possui um propósito específico, sendo então uma linguagem “general purpose”. Isso permite com que ela seja utilizada em diversas aplicações, incluindo a simulação de sistemas de potência e a resolução de sistemas de equações por métodos numéricos. (DAMAS, 2006)

Como anteriormente especificado, a capacidade de inverter uma matriz é indispensável na execução do método Newton-Raphson. A linguagem C não possui, por padrão, uma função que realize esta operação. Por conta disso, torna-se necessária a implementação de um método numérico robusto para tal.

4.4 Método da eliminação de Gauss-Jordan

O método da eliminação de Gauss foi desenvolvido por Carl Frederick Gauss em torno do ano de 1880, para a solução de problemas de mínimos quadrados. Ele consiste na utilização de três operações elementares nas linhas de uma matriz de forma a reduzi-la a uma matriz triangular. As operações que podem ser realizadas entre as linhas constituem-se da multiplicação da linha por um escalar, a substituição de duas linhas e a soma de uma linha pelo múltiplo de outra (UDAWAT et al.,2021). Este método é muito utilizado para a solução de equações lineares, pois após a matriz triangular ser obtida, o conjunto de equações pode ser facilmente resolvido por substituição de variáveis.

A eliminação de Gauss-Jordan surgiu como uma variação do método de Gauss, sendo descrito pelo geodesta Wilhelm Jordan em 1887 (UDAWAT et al.,2021). Ao invés de apenas reduzir a matriz para uma forma triangular, o método de Gauss-Jordan utiliza as operações de linha para transformar a matriz em uma matriz identidade. Dessa forma, quando utilizado na resolução de sistemas de equações, ele oferece a solução do problema diretamente, sem requerer cálculos adicionais. Do ponto de vista da análise numérica, Gauss-Jordan é menos eficiente que o método de Gauss tradicional, pois envolve aproximadamente 50% mais operações (CHAPRA e CANALE, 2016).

Apesar disso, o método de Gauss-Jordan ainda possui aplicações numéricas relevantes, sendo uma delas a capacidade de gerar uma matriz inversa. Aplicando em uma matriz identidade as mesmas operações que foram utilizadas na matriz original, podemos obter a inversa desta (STRANG, 2016).

4.5 Materiais em estudo

O sistema-teste analisado foi o IEEE 14 barras, que corresponde a uma parte do sistema elétrico de potência americano no ano de 1962. Este sistema possui 4 barras de geração, 9 barras de carga, 17 linhas e 3 transformadores (IEEE 14-Bus

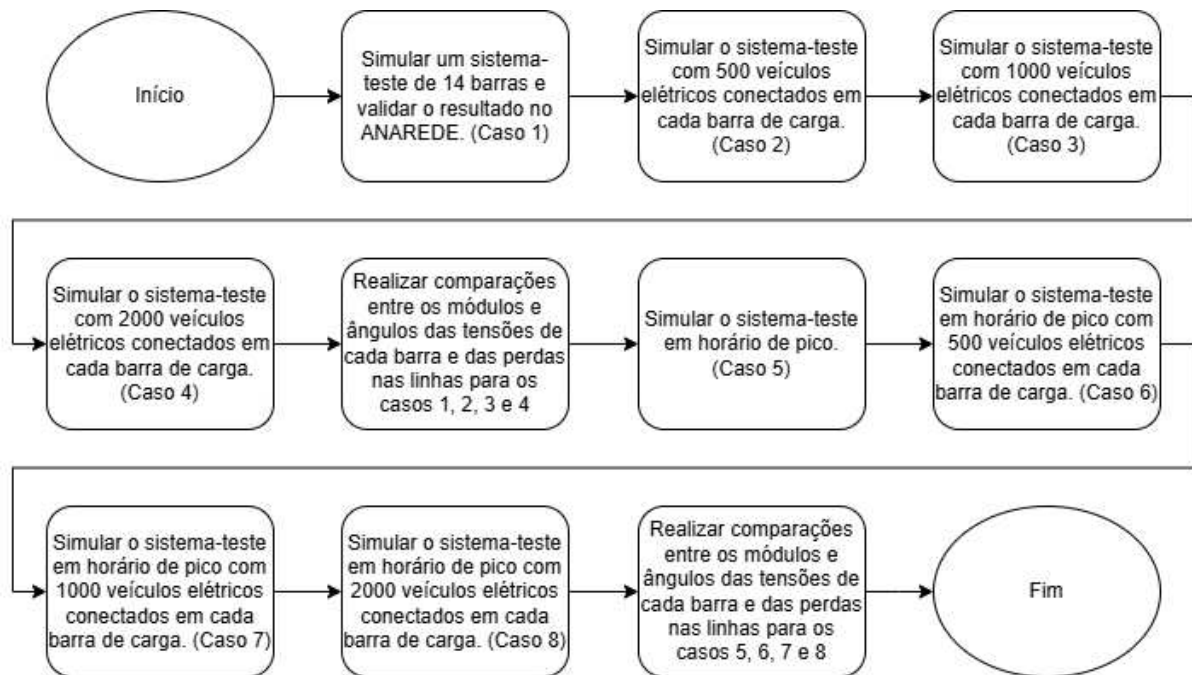
Tabela 4 - Consumo de potência em relação ao aumento de veículos elétricos no sistema

Quantidade de carros	Aumento de potência ativa(p.u.)
500	0.035
1000	0.07
2000	0.14

Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 9 ilustra detalhadamente os passos do processo de análise do fluxo de potência do sistema-teste de 14 barras. Inicialmente, foi realizada a simulação do sistema em seu caso base (caso 1). Em seguida, procederam-se as simulações considerando a inclusão de 500 (caso 2), 1000 (caso 3) e 2000 (caso 4) veículos elétricos em cada barra de carga. Após isso, foram analisados os resultados dos casos 1, 2, 3 e 4, comparando-se as tensões nas barras e perdas ativas nas linhas. Posteriormente, foram realizadas as simulações do sistema em horário de pico (caso 5), incluindo os cenários com 500 (caso 6), 1000 (caso 7) e 2000 (caso 8) veículos elétricos em cada barra de carga. As análises dos casos 5, 6, 7 e 8 foram então realizadas, onde novamente estudaram-se as tensões nas barras e as perdas ativas nas linhas.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados foram confirmados através do ANAREDE, um *software* desenvolvido pela CEPEL-DSE para a solução de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson completo (ANAREDE-CEPEL). O ANAREDE permite apenas 5 caracteres para as variáveis de barra, por conta disso valores com quatro casas decimais foram arredondados para três. Os resultados também foram ajustados para condizer com a quantidade de algarismos significativos apresentados pelo ANAREDE.

A primeira etapa da análise envolveu a validação do código. Para isso foi utilizado o sistema-teste IEEE 14 barras em seu estado inalterado. A funcionalidade do código foi averiguada através da comparação com os resultados do ANAREDE. Para este fim, o valor do módulo e ângulo da tensão das barras do sistema foram calculados nos dois programas e comparados entre si.

Com o código validado, ele foi utilizado para a simulação do sistema em diferentes condições de uso. Foram estudadas oito situações diferentes, sendo cada uma representada através da modificação dos valores de potência ativa e reativa nas barras de carga.

4.6.1 Caso 1 - Horário fora de pico

O caso base, denominado caso 1, refere-se ao sistema em seu estado não modificado. Seus dados foram utilizados para validar o método do cálculo do fluxo de potência e realizar a comparação entre os casos 2, 3 e 4.

4.6.2 Caso 2 - Horário fora de pico com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga

Para a simulação dos veículos elétricos na rede de transmissão de energia elétrica, foi considerado um aumento na potência ativa de cada barra. A intenção dessa alteração é simular o uso da bateria como um consumidor de potência ativa na rede. Foram utilizados os mesmos dados para as barras do sistema anterior, sendo somados 0.035 pu no consumo da potência ativa das barras PQ.

4.6.3 Caso 3 - Horário fora de pico com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga

De forma similar ao cenário anterior, foi somado 0.07 pu no consumo de potência ativa de cada barra PQ. Os outros dados do sistema se mantêm inalterados comparados ao caso base.

4.6.4 Caso 4 - Horário fora de pico com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga

Neste cenário, foi adicionado 0.14 pu ao consumo de potência ativa de cada barra PQ. Os demais dados do sistema permanecem inalterados em relação ao caso base.

4.6.5 Caso 5 - Horário de pico

A simulação do sistema em horário de pico envolve um aumento de 50% no consumo de potência ativa e reativa das barras de carga em relação a simulação 1. Estes parâmetros foram baseados nos delineados no trabalho de DELMASQUIO (2022), que simula um horário de pico da mesma forma. Estes resultados servem como base para as comparações entre os cenários 6, 7 e 8

4.6.6 Caso 6 - Horário de pico com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga

Este caso é representado por um aumento de 50% no consumo de potência ativa e reativa das barras de carga em comparação com o caso 1. Após isso, foi adicionado 0.07 pu no consumo de potência ativa de cada barra PQ.

4.6.7 Caso 7 - Horário de pico com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga

Neste cenário, observa-se um aumento de 50% no consumo de potência ativa e reativa das barras de carga em relação ao caso 1. Além disso, foi adicionado 0,07 pu ao consumo de potência ativa de cada barra PQ.

4.6.8 Caso 8 - Horário de pico com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga

Para este caso, há um aumento de 50% no consumo de potência ativa e reativa nas barras de carga, comparado ao caso 1. Adicionalmente, foi somado 0,14 pu ao consumo de potência ativa de cada barra PQ.

4.7 Tratamento dos dados

Em relação ao tratamento de dados, foi realizada uma comparação direta entre os resultados obtidos em cada simulação para avaliar as perdas ativas totais nas linhas, o módulo da tensão em cada barra e o ângulo da tensão em cada barra. Os casos 1, 2, 3 e 4 e os casos 5, 6, 7 e 8 foram comparados entre si, com o caso 1 servindo como referência para os valores do primeiro grupo e o caso 5 sendo a referência para o segundo.

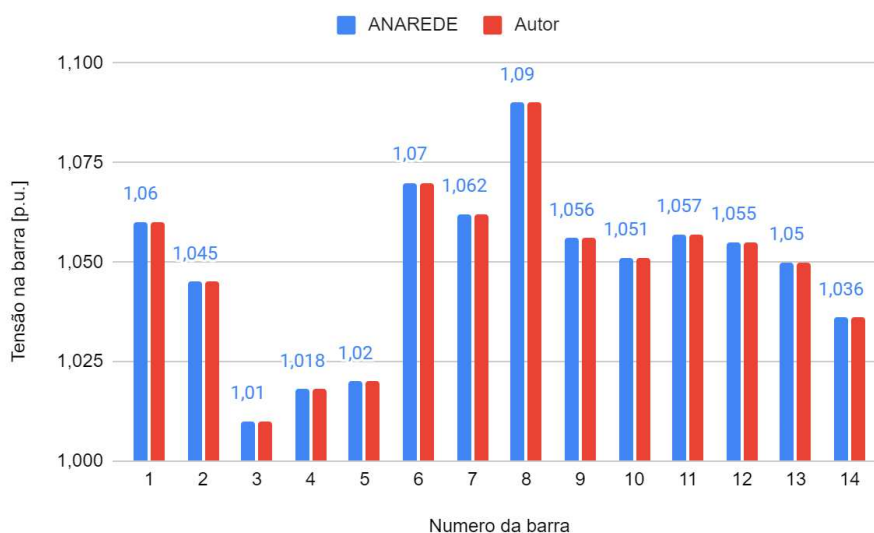
5 RESULTADOS

Neste capítulo, são discutidos os resultados das simulações dos oito casos estudados. Inicialmente, realiza-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo programa ANAREDE e pelo código desenvolvido para a solução do fluxo de potência do sistema-teste de 14 barras. Em seguida, são analisados os resultados dos casos 1, 2, 3 e 4, comparando-se as tensões nas barras e as perdas ativas nas linhas. Posteriormente, apresenta-se a análise dos casos 5, 6, 7 e 8, também considerando as tensões nas barras e as perdas ativas nas linhas.

5.1 Caso base

Primeiro foi realizada a solução do fluxo de potência do caso base, de forma a validar o código utilizado no trabalho. A Figura 10 apresenta os resultados do programa desenvolvido para a solução do problema comparado com os resultados do programa ANAREDE. Foi possível observar que os valores encontrados pelos dois programas foram coerentes no que se refere ao módulo da tensão nas barras.

Figura 10 - Comparação entre resultados das tensões das barras

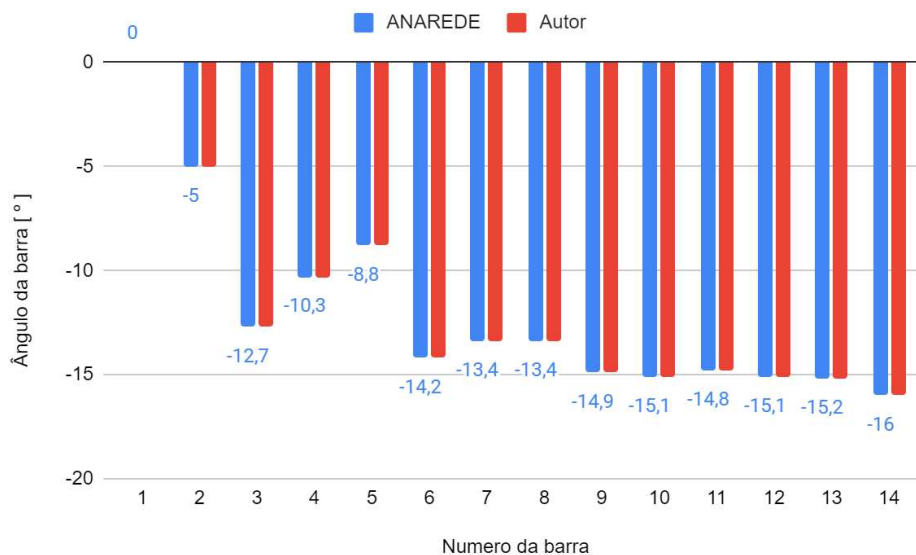


Fonte: Autoria própria (2024)

Também foram comparados os resultados para ângulos da tensão de cada barra dos dois programas. É possível verificar pela Figura 11 que os resultados referentes ao ângulo da tensão das barras são condizentes entre os dois programas. Com isso, é nítido que o cálculo do método de Newton-Raphson utilizado pelo autor

foi implementado de forma correta. Dessa maneira, será possível aplicar o programa para a solução do sistema em diferentes estados de uso.

Figura 11 - Comparação entre resultados dos ângulos das barras



Fonte: Autoria própria (2024)

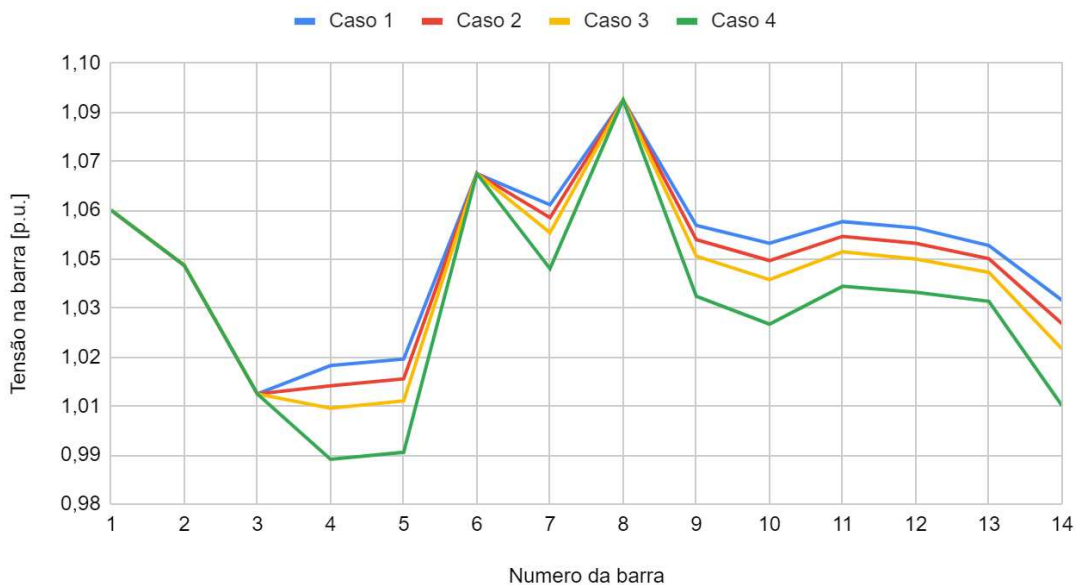
5.2 Sistema em horário fora de pico

A primeira situação que foi analisada refere-se ao STEE em um horário fora de pico. Como estabelecido anteriormente, diferentes níveis de adoção de VEs serão considerados. Nos seguintes gráficos, estes casos são denominados Caso 1, Caso 2, Caso 3 e Caso 4, para os valores de 0, 500, 1000 e 2000 carros respectivamente.

A Figura 12 demonstra a tensão resultante em cada barra para cada caso. O aumento da carga resultou em uma queda de tensão em todas as barras PQ, com o caso 4 apresentado as maiores quedas de tensão. Para as barras PV (Barras 2, 3, 6 e 8) e de referência (Barra 1) não houve queda de tensão, pois nessas barras a tensão é fornecida no problema.

Vale destacar que as barras 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 inicialmente apresentam tensões superiores ao limite aceitável de 1,05 p.u., devido às condições iniciais do sistema. Portanto, a redução de tensão causada pelo aumento da carga tecnicamente aprimorou o módulo de tensão nas barras 7, 9, 10, 11, 12 e 13.

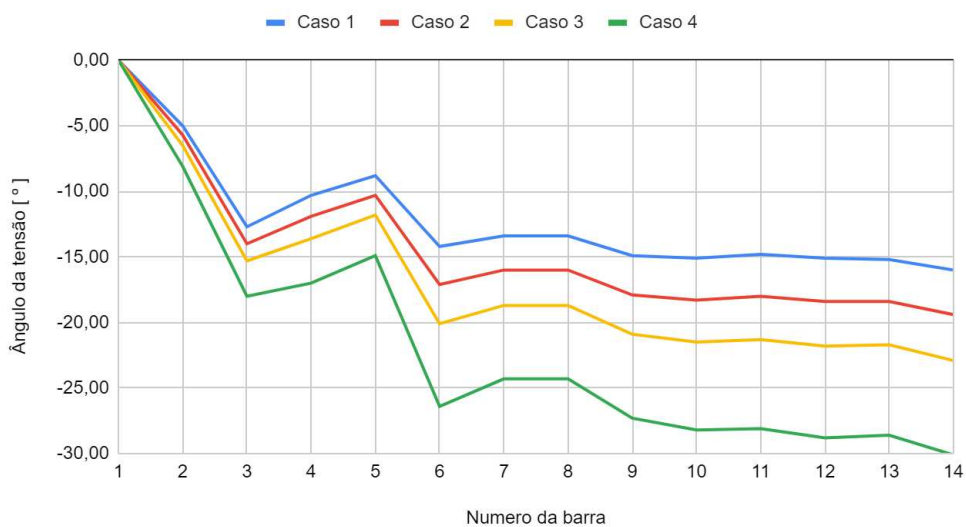
Figura 12 - Relação de tensão das barras em horário fora de pico



Fonte: Autoria própria (2024)

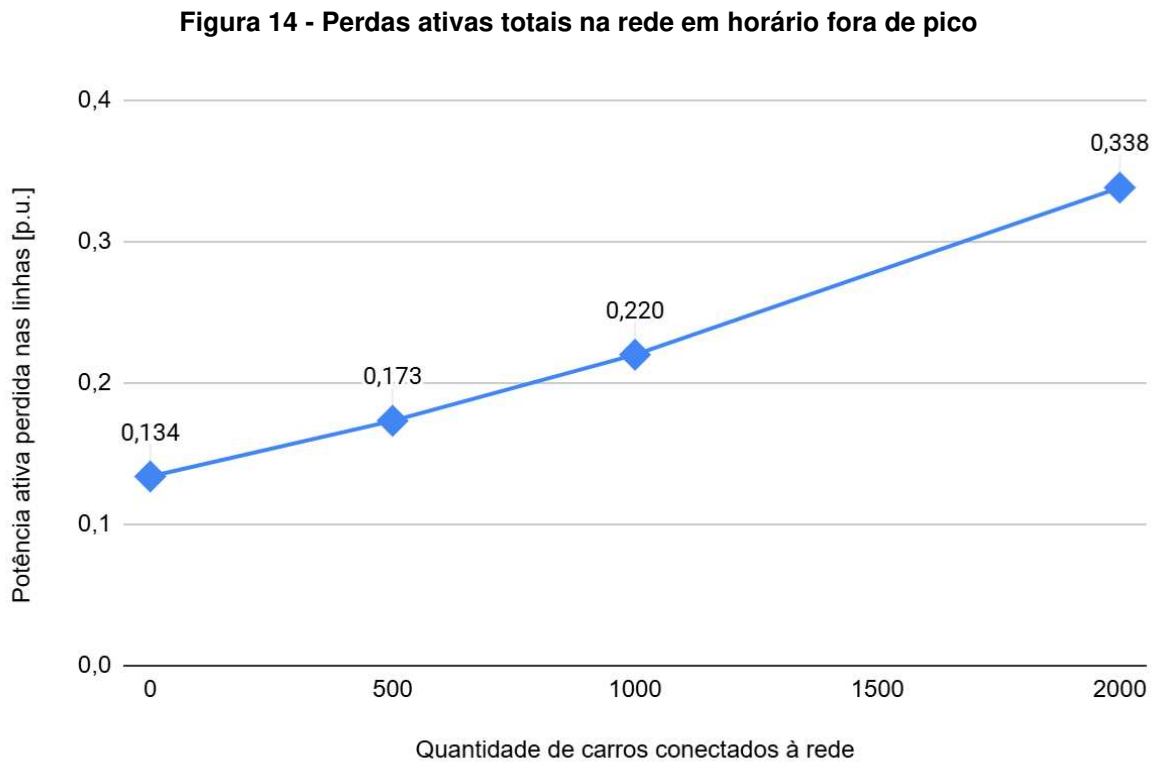
A Figura 13 ilustra os resultados dos ângulos de tensão nos casos 1, 2, 3 e 4. O aumento da carga no sistema resultou na redução dos ângulos em todas as barras. Essa diminuição tornou-se mais acentuada à medida que a carga nas barras se intensificou.

Figura 13 - Relação do ângulo das barras em horário fora de pico



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 14 apresenta o resultado das perdas ativas nas linhas. O caso 1 constou uma perda total de 0,134 p.u., o caso 2 apresentou uma perda de 0,173 p.u., o caso 3 teve uma perda de 0,220 p.u. e o caso quatro resultou em uma perda total de 0,338 p.u.

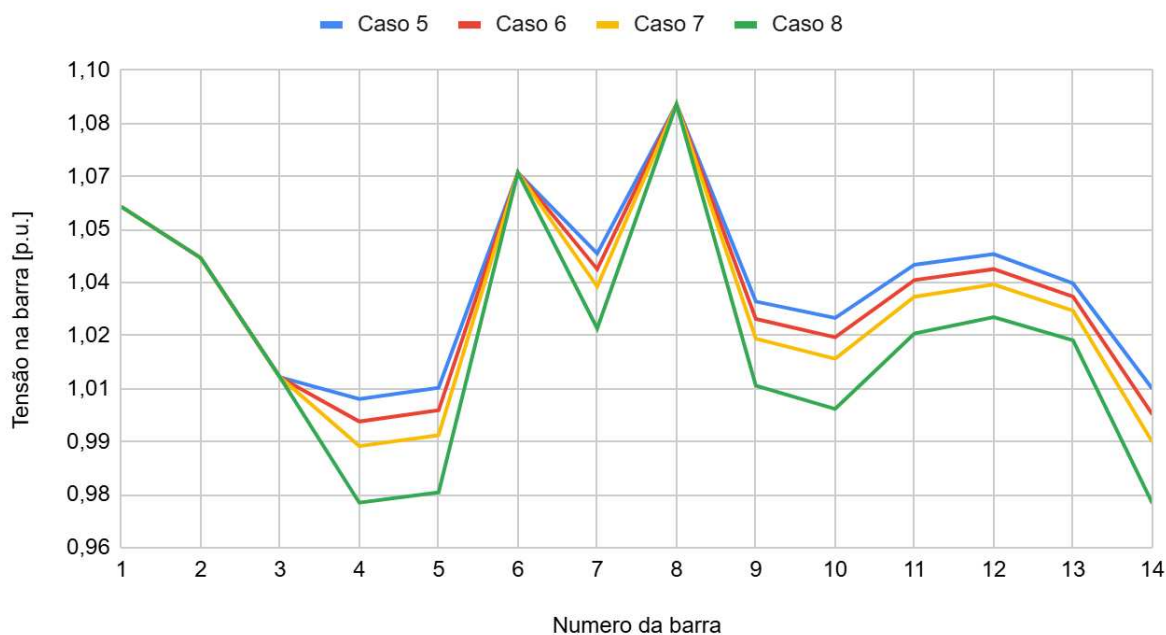


Fonte: Autoria própria (2024)

5.3 Sistema em horário de pico

Também foi estudado o sistema em uma situação pico hipotética, onde o consumo de potência ativa e reativa das barras de carga sistema foi aumentado em 50%. Baseado no trabalho de DELMASQUIO (2022), a intenção deste cenário é simular uma situação onde o usuário padrão carregará seu veículo assim que regressar de seu ofício. As mesmas quantidades de carros dos casos anteriores foram analisadas.

A Figura 15 demonstra os resultados do módulo da tensão das barras para os casos 5, 6, 7 e 8. Assim como nos cenários fora do horário de pico, o aumento da carga resultou em uma redução nos níveis de tensão. Isso ocorreu devido ao aumento da corrente, que levou a maiores perdas nas linhas.

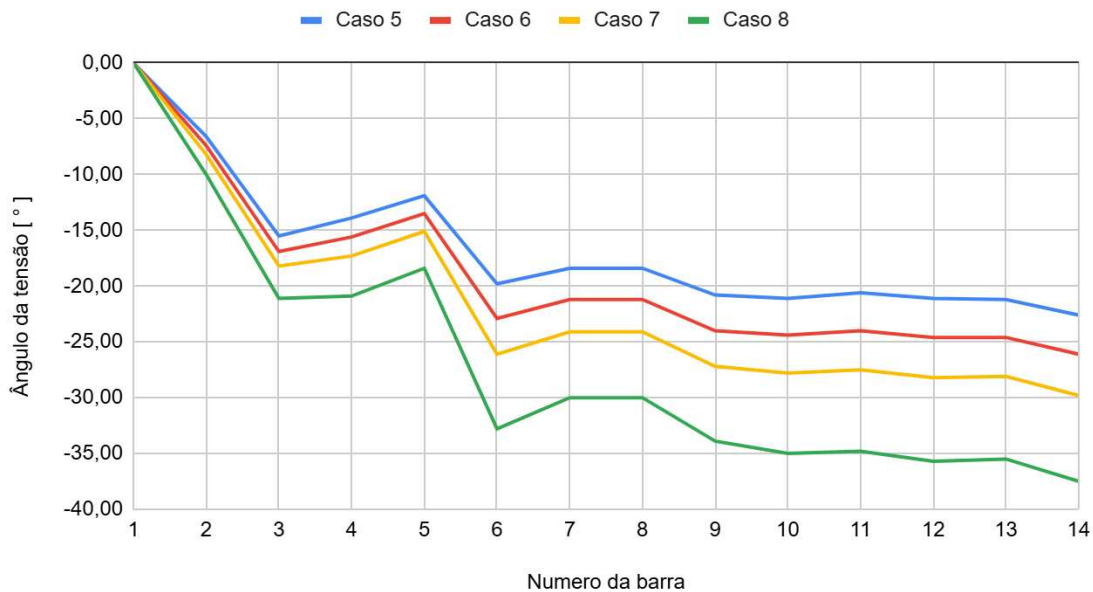
Figura 15 - Relação de tensão das barras em horário de pico.

Fonte: Autoria própria (2024)

O aumento na potência reativa resultou na redução da tensão em todas as barras em comparação com o caso base. Assim, nenhuma das barras de carga está sofrendo de sobretensão. No entanto, as barras 1, 6 e 8 ainda apresentam uma tensão superior ao limite aceitável de 1,05 p.u.

Analisando os resultados dos casos 5, 6, 7 e 8, observou-se que os ângulos das tensões de cada barra sofreram alterações mais significativas do que seus módulos, devido ao aumento da potência ativa. Isso é evidente na Figura 16, onde a barra 15 atingiu um ângulo de $-37,5^\circ$ no caso 8.

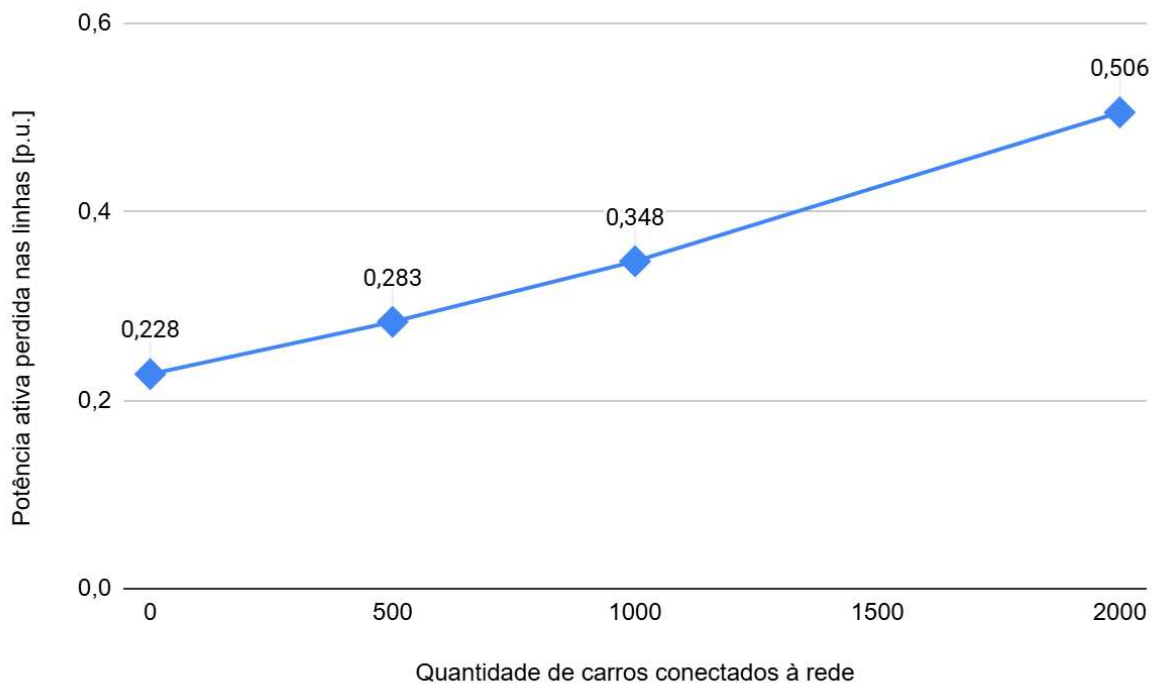
Figura 16 - Relação do ângulo das barras em horário de pico



Fonte: Autoria própria (2024)

As perdas nas linhas cresceram conforme o número de carros elétricos na rede aumentou, como pode ser observado na Figura 17. Para o caso 5 as perdas foram de 0,228 p.u., para o caso 6 foram de 0,283 p.u., para o caso 7 foram de 0,348 p.u. e no caso 8 foram de 0,506 p.u.

Figura 17 - Perdas ativas totais na rede no horário de pico



Fonte: Autoria própria (2024)

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram realizadas diferentes simulações para analisar o possível efeito da inserção de veículos elétricos no sistema-teste de transmissão de energia elétrica IEEE 14 barras. Primeiro, estabeleceu-se uma forma de modelar o impacto de um veículo elétrico na rede. Após isso, foram decididos quatro casos diferentes a serem comparados: o sistema em sua configuração original e com 500, 1000 e 2000 carros adicionais em cada barra de carga.

As mesmas análises foram então realizadas com o sistema em um possível horário de pico de uso, para o qual foi aumentado 50% do consumo de potências ativas e reativas nas barras de carga. O sistema IEEE 14 barras foi escolhido para este teste por conta de seu tamanho e presença de diferentes equipamentos elétricos, como geradores e transformadores.

Um dos objetivos principais desta tese foi a criação de um programa capaz de resolver o problema do fluxo de potência de um sistema relativamente complexo, através do método de Newton-Raphson. Isso foi realizado com sucesso, e o código do autor foi capaz de obter os mesmos resultados que o programa ANAREDE em todos os casos.

Os primeiros casos a serem analisados foram o sistema em seu estado base sem nenhum veículo conectado à rede (caso 1), o sistema em seu estado base com 500 veículos elétricos conectados em cada barra de carga (caso 2), o sistema em seu estado base com 1000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga (caso 3) e o sistema em seu estado base com 2000 veículos elétricos conectados em cada barra de carga (caso 4).

Como esperado, um aumento na potência consumida pelas barras resultou em um pior perfil de tensão nas mesmas. É válido notar que, mesmo no caso 4, o módulo da tensão das barras nunca assumiu um nível inaceitável. O menor valor de tensão atingido por qualquer barra foi 0,992 p.u. para a barra 4.

No entanto, o ângulo da tensão sofreu alterações mais radicais, com a barra 14 no caso 4 chegando ao nível de $-30,1^\circ$. Isso se deve ao fato que alterações na potência ativa de uma barra tendem a impactar o ângulo da tensão de forma mais intensa que seu módulo.

Os valores das perdas ativas no sistema aumentam conforme o acréscimo da carga. A inclusão de 500 veículos em cada barra de carga resultou em um incremento de 29,10% no caso 2 em comparação com o caso 1. A adição de 1000 veículos elevou as perdas em 64,18% no caso 3 em relação ao caso 1, enquanto 2000 veículos causaram um aumento de 152,24% no caso 4 comparado ao caso 1. Isso ocorre devido ao aumento da corrente nas linhas, que é consequência da maior demanda.

Um ponto que requer atenção especial é o fato que as perdas nas linhas aumentaram mais conforme a carga no sistema cresceu. Dessa forma, é possível que distribuir cargas de forma mais homogênea ao longo de diferentes STEEs resulte em uma maior eficiência para o sistema elétrico em geral.

Após isso foram realizadas as simulações do sistema em horário de pico (aumento de 50% no consumo de potência ativa e reativa das barras de carga do sistema) sem nenhum veículo conectado à rede (caso 5), do sistema em horário de pico com 500 veículos conectados em cada barra de carga (caso 6), do sistema em horário de pico com 1000 veículos conectados em cada barra de carga (caso 7) e do sistema em horário de pico com 2000 veículos conectados em cada barra de carga (caso 8).

O módulo da tensão nas barras para estes casos continua relativamente estável, apesar de sofrer uma leve redução quando comparado aos casos anteriores (1, 2, 3 e 4). O menor módulo de tensão atingindo foram das barras 4 e a 14 no caso 8, com 0,973 p.u.

Mantendo a tendência observada nos casos 1, 2, 3 e 4, as perdas no sistema aumentaram conforme o número de veículos conectados cresceu. O caso 6 apresentou um incremento de 25,12% nas perdas em relação ao caso 5, enquanto o caso 7 registrou um aumento de 53,63% comparado ao caso 5 e o caso 8 apresentou uma elevação de 121,92% em comparação ao caso 5.

Como esperado, o aumento da carga resultou em uma piora na tensão e ângulo de todas as barras de carga para todos os casos. Esta deterioração foi apenas exacerbada conforme o consumo de potência na rede se intensificou. No geral, o ângulo da tensão sofreu maiores mudanças do que o seu módulo, indicando que os operadores do STEE devem usar métodos de controle de ângulo para compensar o aumento do consumo de potência ativa causado por veículos elétricos.

A maior demanda também resultou em correntes mais elevadas nas linhas, levando a um aumento nas perdas elétricas do sistema. Considerando isso, é possível

que o STEE necessite de um redimensionamento para suportar a carga adicional dos VEs case sus níveis de adoção aumentem.

Ainda assim, existem políticas públicas que podem amenizar este problema. Pontos de carregamento públicos ofereceriam a consumidores a possibilidade de carregar seus veículos eficientemente, em horários de menor uso da rede. Também seria possível para órgãos governamentais ou distribuidoras buscarem parcerias com a iniciativa privada, oferecendo possíveis benefícios financeiros para entidades que realizarem a instalação de carregadores rápidos em seus estabelecimentos. Adicionalmente, a mudança da forma de cobrança para a tarifa branca criaria um incentivo financeiro para os usuários da rede distribuírem as suas recargas ao longo do dia.

Neste estudo, adotou-se uma simplificação no padrão de consumo dos usuários da rede, assumindo-se que todas as recargas ocorreram de forma simultânea. Pesquisas futuras poderiam se dedicar a modelar um padrão de consumo que reflita com maior precisão a realidade.

A distribuição dos veículos também foi realizada de forma arbitrária, com um número fixo de carros sendo adicionado em cada barra de carga. Trabalhos futuros podem fazer uso de recursos como o método de Monte Carlo para obter um arranjo de VEs mais condizente com a realidade. Também não foram aplicados métodos para controlar a tensão ou o ângulo das barras.

Finalmente, o sistema-teste IEEE 14 barras difere significativamente de STEEs modernos, possuindo pouca carga de potência reativa e uma baixa tensão base. A utilização de sistemas mais atuais permitiria a obtenção de resultados mais relevantes. Todos esses pontos são conceitos que podem ser aplicados em trabalhos futuros para expandir o escopo da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANAREDE-CEPEL. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/anared-2/>

ASSESSORIA ESPECIAL DE COMUNICAÇÃO. **ANTT inicia estudo de viabilidade para substituir frota por carros elétricos e híbridos.** Disponível em:

<<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/antt-inicia-estudo-de-viabilidade-para-substituir-frota-por-carros-eletricos-e-hibridos>>. Acesso em: 13 de junho de 2024.

BARASSA, Edgar; CRUZ, Robson Ferreira da; MORAES, Henrique Botin. **Roadmap nacional para infraestrutura da mobilidade elétrica no Brasil: promovendo produtos, serviços, tecnologias e regulação no horizonte 2032.** Brasília: AES Brasil, jun. 2022

BATISTA, Maria Rita.; ESCOBAR DE OLIVEIRA, Marcelo. **Inserção de Veículos Elétricos em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.** Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia, v. 2, n. 2, p. 85–96, 31 dez. 2020.

BOÇON, S. G. **ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2019, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Disponível em:

<https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24732/1/2019_GustavoSchafhauserBocon_tcc.pdf>.

BUENO, P. T.; GASPARETTO REBELATTO, B. .; LANGE SALVIA, A.; RODRIGUES, G. .; LONDERO BRANDLI, L. **ANÁLISE SWOT DA ESTRATÉGIA DE EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR ON-GRID PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL.** In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA, 4., 2023.** Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2023. DOI: 10.46421/singeurb.v4i00.3601. Disponível em:

<https://eventos.antac.org.br/index.php/singeurb/article/view/3601>. Acesso em: 12 maio. 2024.

CAMARGO, Leonardo Henrique da Silva. **Análise de cenários da inserção de veículos elétricos em conjunto com geradores fotovoltaicos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/32786> (Acesso 22/07/2024)

CAPATA, Roberto. **Urban and extra-urban hybrid vehicles: a technological review**. *Energies*, v. 11, n. 11, out. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2924>

CARDOSO, Giovana. **Frota de carros elétricos e híbridos aumenta 787% em cinco anos no Brasil**. Disponível em: <<https://noticias.r7.com/brasil/frota-de-carros-eletricos-e-hibridos-aumenta-787-em-cinco-anos-no-brasil-03032024/>>. Acesso em: 13 de junho de 2024.

CECHINEL, B. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM CASOS DE CONTINGÊNCIA SIMPLES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E COMPENSAÇÃO PARALELA**. Medianeira [s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/32909/1/analiseestabilidadetensaocontingencia.pdf>>. Acesso em: 2 de maio de 2024.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos numéricos para engenharia**. [s.l.]: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788580555691. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555691/>. Acesso em: 01 mai. 2024.

DAMAS, Luís. **Linguagem C**. [s.l.]: Grupo GEN, 2006. E-book. ISBN 9788521632474. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632474/>. Acesso em: 02 mai. 2024.

DELMASQUIO, L. **IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON CONSIDERANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E**

VEÍCULOS ELÉTRICOS. Araranguá [s.n.]. 2022 Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237573>

FACHIN, P. **Uso de combustíveis fósseis X mobilidade urbana:** desafios para o Brasil. 13 jul. 2016. Disponível em: [https://www.ecodebate.com.br/2016/07/13/uso-](https://www.ecodebate.com.br/2016/07/13/uso-de-combustiveis-fosseis-x-mobilidade-urbana-desafios-para-o-brasil/)

[de-combustiveis-fosseis-x-mobilidade-urbana-desafios-para-o-brasil/](https://www.ecodebate.com.br/2016/07/13/uso-de-combustiveis-fosseis-x-mobilidade-urbana-desafios-para-o-brasil/).

FERREIRA, José Rodrigo Santos; SILVA, Kessiane de Sousa; ALMEIDA, Edvan Carneiro. ANÁLISE DO IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE ELÉTRICA URBANA. **Revista ft**, v. 29, n. 140, p. 32-33, 24 nov. 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.69849/revistaft/ra10202411241232>

FEY, A.; SOARES, B.; PERDONCINI, O. **ESTUDO DO FLUXO DE CARGA CONSIDERANDO OS LIMITES DE REATIVOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS.**

Curitiba [s.n.]. Disponível em:

<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9845/1/CT_COELE_2019_1_17.pdf

>. Acesso em: 2 de maio de 2024.

IEA, World Energy Outlook 2022. Disponível em: < <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> >.

IEEE 14-Bus System - Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG). Disponível em: < <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-14-bus-system/> >.

LOPES TOLEDO, André; LÈBRE LA ROVERE, Emílio. Urban Mobility and Greenhouse Gas Emissions: Status, Public Policies, and Scenarios in a Developing Economy City, Natal, Brazil. **Sustainability**, v. 10, n. 11, 3995, 1 nov. 2018.

Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/su10113995> >.

MONTICELLI, Alcir; GARCIA, Arioaldo. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica.** 1. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2003. 264 p. v. 1. ISBN 978-85-263-0945-1.

OLIVEIRA, L. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO UTILIZANDO O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON CONVENCIONAL PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA**. Cornélio Procópio [s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27071/1/CP_COELT_2017_1_02.pdf>. Acesso em: 2 de maio de 2024.

OLIVEIRA, Iberê C.; SILVEIRA, Miguel F.; FUJISAWA, Cassio H.; et al. **Transmissão e Distribuição de Energia**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. E-book. p.Capa. ISBN 9786556902111. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556902111/>. Acesso em: 2 de maio de 2024.

PIOTROWSKI, Leonardo Jonas et al. **Análise Técnica da Inserção de Veículos Elétricos e Geração Fotovoltaica no Sistema de Distribuição**. 18 maio 2021.

RAMOS, Nuno Filipe Simão. **Sustentabilidade ambiental: a viabilidade de um negócio associado à mobilidade elétrica**. 2022. 117 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) – Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal, 2022.

SALIM, L. **Crescimento de veículos elétricos derrubará demanda por petróleo - OC | Observatório do Clima**. Disponível em: <<https://www.oc.eco.br/em-crescimento-frota-de-veiculos-eletricos-derrubara-demanda-por-petroleo-diz-agencia/>>. Acesso em: 13 de junho de 2024.

STRANG, G. **Introduction to linear algebra**. Wellesley, Ma: Cambridge Press, 2016.

UDAWAT, B. et al. **Gauss Jordan method for balancing chemical equation for different materials**. Materials Today: Proceedings, jun. 2021.

UW Electrical Engineering. **pg_tca14bus**. Disponível em: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm>. Acesso em: 30 de maio 2024.

WADY, Ariane Fucci. **Os sinais regulatórios necessários para o desenvolvimento da mobilidade elétrica na cidade: uma abordagem com foco na infraestrutura de recarga**. 2021. 152 p. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, São Paulo, 2021.