



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MELQUESEDEC DA SILVA ARAGÃO XAVIER

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA REDE DE TRANSMISSÃO DE PERNAMBUCO COM  
A INTEGRAÇÃO DE CARREGADORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS  
RODOVIAS DO ESTADO.**

Recife  
2025

MELQUESEDEC DA SILVA ARAGÃO XAVIER

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA REDE DE TRANSMISSÃO DE PERNAMBUCO  
COM A INTEGRAÇÃO DE CARREGADORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS  
RODOVIAS DO ESTADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Alex Ferreira Falcão Moreira

Recife  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Xavier, Melquesedec da Silva Aragão.

Avaliação dos impactos na rede de transmissão de Pernambuco com a integração de carregadores para veículos elétricos nas rodovias do estado. / Melquesedec da Silva Aragão Xavier. - Recife, 2025.

70 p. : il., tab.

Orientador(a): Alex Ferreira Falcão Moreira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Veículos elétricos. 2. Anarede. 3. Organon. 4. Planejamento Operacional.

5. Impactos na Rede. I. Moreira, Alex Ferreira Falcão. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



MELQUESEDEC DA SILVA ARAGÃO XAVIER

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA REDE DE TRANSMISSÃO DE PERNAMBUCO  
COM A INTEGRAÇÃO DE CARREGADORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS NAS  
RODOVIAS DO ESTADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 10/04/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alex Ferreira Falcão Moreira (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Eng. M.Sc. Gustavo Azevedo Teixeira (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

A todos que, direta ou indiretamente, ajudaram a tornar este trabalho possível, minha sincera gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional, paciência e incentivo nos momentos mais difíceis. Em especial, à minha mãe, Marivânia, cuja força e dedicação tornaram possível cada passo desta jornada. Seu esforço incansável para me proporcionar meios de estudar, mesmo diante das dificuldades, é a maior prova de amor e generosidade que alguém poderia oferecer. Tudo o que conquistei até aqui carrega um pouco do seu sacrifício e do seu exemplo de perseverança.

Minha gratidão também à minha avó Marlene e ao meu avô Raimundo, que sempre me cercaram de carinho e apoio, assim como à minha irmã Jadielly, minha grande companheira de vida. Ao meu pai, Jadiael, agradeço por me ensinar, de sua maneira, o valor da determinação e do trabalho árduo.

Ao amor da minha vida, Emily, minha gratidão eterna. Seu apoio incondicional, paciência e carinho foram fundamentais em cada etapa desta jornada. Nos momentos de cansaço, suas palavras de incentivo me deram forças para continuar, e sua presença tornou esse caminho mais leve e significativo. Obrigado por acreditar em mim, mesmo quando eu duvidei, e por estar ao meu lado em cada desafio. Este trabalho também é, de certa forma, um reflexo do amor e da parceria que construímos juntos.

Aos meu orientador, Alex Moreira, que compartilhou sua visão e conhecimento à respeito do meu trabalho, sendo de grande importância para que este trabalho fosse concluído.

Aos meus amigos e colegas de curso, José Fernando, Carlos Daniel e Brenda Estefany pelo apoio mútuo, pelas trocas de conhecimento e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve e enriquecedora.

Ao CapibaribE Racing, que também foi parte essencial dessa trajetória, ampliando meus horizontes sobre veículos elétricos e contribuindo significativamente para minha formação acadêmica e profissional. A experiência adquirida e os desafios superados dentro da equipe foram fundamentais para meu crescimento.

À Universidade Federal de Pernambuco e aos professores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, seja por meio de ensinamentos passados nas cadeiras, ou sugestões de trabalho.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a todos os profissionais que fazem parte dessa instituição, minha profunda gratidão. Durante meu estágio, tive a oportunidade de aprender com alguns dos melhores especialistas do setor elétrico, adquirindo conhecimentos valiosos que contribuíram significativamente para a construção deste trabalho. Seja por meio de orientações diretas, experiências compartilhadas ou pelo ambiente desafiador e estimulante, cada aprendizado foi essencial para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, participaram dessa jornada e tornaram possível a concretização deste projeto.

Meu sincero obrigado!

O desenvolvimento humano depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de seu cérebro criativo. Seu objetivo final é o completo domínio da mente sobre o mundo material e o aproveitamento das forças da natureza em favor das necessidades humanas.  
(TESLA; Nikola)



## RESUMO

A mobilidade elétrica tem se consolidado como uma alternativa viável para a redução das emissões de carbono e da dependência de combustíveis fósseis. No entanto, a expansão da frota de veículos elétricos traz desafios para a infraestrutura elétrica, exigindo um planejamento adequado para garantir a confiabilidade do suprimento energético. Este trabalho analisa o impacto da inserção de carregadores de veículos elétricos na rede elétrica do estado de Pernambuco, com foco no carregamento das subestações de fronteira e na capacidade do sistema de distribuição. Foram realizadas simulações por meio dos softwares ANAREDE e ORGANON, considerando diferentes cenários de demanda, avaliando o comportamento dos transformadores e a influência dos seus parâmetros elétricos, como resistência e reatância equivalente, que impactam diretamente o seu carregamento. Os resultados indicam que, embora a maioria das subestações opere dentro dos limites técnicos, algumas apresentam sobrecarga significativa independentemente da conexão das cargas dos carregadores. Isso evidencia um esgotamento da capacidade de transformação dessas subestações, tornando necessário o reforço da infraestrutura para evitar impactos na qualidade do fornecimento de energia.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos, ANAREDE, ORGANON, Planejamento Operacional, Impactos na rede.

## ABSTRACT

Electric mobility has emerged as a viable alternative for reducing carbon emissions and dependence on fossil fuels. However, the expansion of the electric vehicle fleet presents challenges for the electrical infrastructure, requiring proper planning to ensure the reliability of energy supply. This study analyzes the impact of integrating electric vehicle chargers into the electrical grid of the state of Pernambuco, focusing on the loading of transmission-distribution substations and the capacity of the distribution system. Simulations were carried out using the ANAREDE and ORGANON software tools, considering different demand scenarios to evaluate the performance of power transformers and the influence of their electrical parameters, such as equivalent resistance and reactance, which directly affect their loading. The results indicate that, although most substations operate within technical limits, some experience significant overloads regardless of the connection of electric vehicle chargers. This highlights the saturation of the transformation capacity of these substations, emphasizing the need to reinforce the infrastructure in order to prevent negative impacts on the quality of power supply.

**Keywords:** Electric vehicles, ANAREDE, ORGANON, Operational Planning, Grid Impacts.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Reconstrução do primeiro veículo elétrico do mundo. ....	18
Figura 2 – principais tipos de veículos elétricos no Brasil. ....	20
Figura 3 - Associação série e paralelo.....	23
Figura 4 - Características da bateria de chumbo ácido. ....	24
Figura 5 - Bateria de lítio de EV .....	25
Figura 6 - Carregador AC 22 kW. ....	27
Figura 7 - Tempo de recarga por potência dos carregadores AC.....	27
Figura 8 - Carregador DC 150 kW .....	28
Figura 9 - Matriz elétrica nacional em 2025 e 2029.....	31
Figura 10 - Subsistemas elétricos do SIN.....	32
Figura 11 - Diagrama elétrico do estado de Pernambuco .....	43
Figura 12 - SE Mirueira, caso de referência original/modificado.....	44
Figura 13 - Comparativo entre os valores de carregamentos em N-1. ....	48
Figura 14 - Formatação de arquivo de contingências para o Organon.....	49
Figura 15 - Arquivo de monitoração do Organon.....	50
Figura 16 - Gerenciador de casos do Organon. ....	51
Figura 17 - Janela Case Manager do Organon. ....	52
Figura 18 - Arquivo de saída Organon.....	52
Figura 19 - SE Pau Ferro. ....	53
Figura 20 - Parâmetros do TR 1 da SE Pau Ferro. ....	54
Figura 21 - Parâmetros do TR 2 da SE Pau Ferro. ....	55
Figura 22 - Parâmetros do TR 3 da SE Pau Ferro. ....	55
Figura 23 - Parâmetros do TR 4 da SE Pau Ferro. ....	56
Figura 24 - Carregamento da SE Mirueira em relação à capacidade nominal. ....	58
Figura 25 - Carregamento da SE Mirueira em relação à capacidade de emergência. .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custo por km rodado de carros à combustão. ....	36
Tabela 2 - Custo por km rodado de EVs.....	36
Tabela 3 - Extensão das rodovias estaduais e federais no estado de Pernambuco. ....	38
Tabela 4 - Quantidade de Postos de recargas x Carga .....	39
Tabela 5 - Divisão das Cargas entre as subestações de fronteira.....	45
Tabela 6 - Comparativo entre carregamento das subestações de fronteira. ....	47
Tabela 7 - Carregamento dos transformadores da SE Pau Ferro.....	54
Tabela 8 - Dados de carregamentos para cenário sem postos de recarga de EVs...57	
Tabela 9 - Dados de carregamentos para cenário com postos de recarga de EVs...58	
Tabela 10 - Comparação entre os casos com/sem carregadores de EVs.....	60
Tabela 11 - Soluções propostas para a SE Mirueira. ....	61
Tabela 12 - Soluções propostas para a SE Jaboatão II. ....	62
Tabela 13 - Soluções propostas para a SE Tacaimbó. ....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEV	Veículo Elétrico à Bateria (Battery Electric Vehicle)
CUST	Contrato de Uso do Sistema de Transmissão
DIT	Demais Instalações de Transmissão
EV	Veículo Elétrico (Electric Vehicle)
HEV	Veículo Elétrico Híbrido (Hybrid Electric Vehicle)
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
ITI	Interligações Internacionais de Transmissão
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PARPEL	Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN
PHEV	Veículo Híbrido Plug-In (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
RB	Rede Básica
RE-PET	Recife-Petrolina
RTE-T	Rede Transeuropeia de Transporte (Trans-European Transport Network)
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistemas Especiais de Proteção
SIN	Sistema Interligado Nacional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral	15
1.1.2	Específicos	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>ELETROMOBILIDADE NO CONTEXTO DE DESCARBONIZAÇÃO</b>	<b>17</b>
2.1	VEÍCULOS ELÉTRICOS	17
2.2	TIPOS DE VEÍCULOS ELETRIFICADOS	19
2.2.1	Veículo Elétrico à Bateria (BEV – Battery Electric Vehicle)	20
2.2.2	Veículo Elétrico Híbrido (HEV - Hybrid Electric Vehicle)	20
2.2.3	Veículos Híbridos PLUG-IN (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	21
2.3	BATERIAS	22
2.3.1	Tipos de Baterias	23
2.3.1.1	<i>Baterias de Chumbo-Ácido</i>	24
2.3.1.2	<i>Baterias de Lítio</i>	24
2.3.1.3	<i>Bateria de Níquel-Cádmio (NiCd)</i>	25
2.3.1.4	<i>Bateria de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH)</i>	25
2.4	CARREGADORES AC/DC	26
2.4.1	Tipos de Carregadores	26
2.4.1.1	<i>Carregadores AC – Corrente Alternada</i>	26
2.4.1.2	<i>Carregadores DC – Corrente contínua</i>	28
<b>3</b>	<b>MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA</b>	<b>30</b>
3.1	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL	31
3.1.1	Instalações de Transmissão	33
3.1.1.1	<i>Rede Básica</i>	33
3.1.1.2	<i>DIT – Demais Instalações da Transmissão</i>	34
<b>4</b>	<b>CRITÉRIOS DE EXPANSÃO DE POSTOS DE RECARGA E MODELAGEM DAS CARGAS PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO</b>	<b>35</b>
4.1	METODOLOGIA EUROPEIA PARA EXPANSÃO DA REDE DE CARREGAMENTO E POPULARIZAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	37
4.2	ADAPTANDO A METODOLOGIA PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO	37
4.3	ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA	40
4.4	MONTAGEM DO CASO BASE	41
4.5	DIVISÃO DAS CARGAS	44
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b>	<b>63</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS	64
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A transição para a mobilidade elétrica tem ganhado cada vez mais espaço no cenário global, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes e pela busca por soluções energéticas mais sustentáveis. Nesse contexto, os veículos elétricos surgem como uma alternativa promissora para substituir gradualmente os motores a combustão, promovendo benefícios ambientais e econômicos a longo prazo. No entanto, a adoção dessa tecnologia exige uma infraestrutura adequada para suprir a demanda por recarga, principalmente para viagens longas, garantindo o funcionamento eficiente e acessível desses veículos.

A disponibilidade de estações de carregamento é um fator determinante para o crescimento do mercado de veículos elétricos, especialmente em regiões onde a rede elétrica pode enfrentar desafios estruturais para suportar a nova demanda energética. O planejamento da instalação dessas estações deve levar em consideração diversos aspectos, como a capacidade da rede de distribuição, a localização estratégica dos pontos de recarga e o impacto que o aumento do consumo pode gerar sobre o sistema elétrico.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar a influência da inserção de carregadores de veículos elétricos na rede elétrica de Pernambuco, considerando a infraestrutura existente e as possíveis adaptações necessárias para garantir a confiabilidade do sistema. A pesquisa busca identificar os desafios técnicos envolvidos nesse processo e propor diretrizes para uma integração eficiente desses dispositivos ao setor elétrico.

O estudo baseia-se na avaliação de subestações estratégicas do estado, considerando parâmetros como carregamento, distribuição de potência e impacto na estabilidade do sistema. A análise permitirá compreender o comportamento da rede diante do crescimento da frota de veículos elétricos e subsidiar medidas para aprimorar a infraestrutura elétrica, tornando-a mais preparada para as demandas futuras da mobilidade sustentável.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

O objetivo deste trabalho é dimensionar uma infraestrutura mínima de carregamento para veículos elétricos no estado de Pernambuco, utilizando uma metodologia reconhecida internacionalmente. Além disso, busca-se avaliar se a inserção dessas novas cargas exigirá reforços ou melhorias no Sistema Interligado Nacional (SIN), contribuindo para a popularização dos veículos elétricos (EVs) e a expansão sustentável da mobilidade elétrica no estado.

### 1.1.2 Específicos

- Investigar o papel dos veículos eletrificados na transição energética global, analisando os diferentes tipos de EVs, suas principais características, vantagens e limitações.
- Analisar o contexto atual da matriz elétrica brasileira, apresentando o SIN, suas divisões e particularidades, além de discutir critérios para o dimensionamento de uma infraestrutura de carregamento para EVs.
- Realizar simulações em regime permanente de operação, por meio do ANAREDE, realizar contingências e obter dados de simulações utilizando o *software* Organon.

## 1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, cada um abordando aspectos específicos da integração da mobilidade elétrica à rede elétrica de Pernambuco. A seguir, é apresentada uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

O Capítulo 2 aborda a importância dos veículos elétricos na transição energética global, destacando os diferentes tipos de veículos eletrificados (BEV, HEV, PHEV) e suas características. Além disso, são discutidos os tipos de baterias utilizadas nesses

veículos e os sistemas de carregamento (AC e DC), com foco nas tecnologias atuais e suas implicações para a infraestrutura de recarga.

No Capítulo 3, é apresentada uma visão geral da matriz elétrica brasileira, com ênfase SIN. São discutidas as principais fontes de geração de energia, como hidrelétricas, eólicas e solares, e a importância da rede de transmissão para a estabilidade do sistema. O capítulo também aborda as instalações de transmissão, incluindo a Rede Básica (RB) e as Demais Instalações de Transmissão (DIT).

O Capítulo 4 apresenta uma metodologia adaptada para dimensionar a infraestrutura mínima de recarga para veículos elétricos no estado de Pernambuco, baseada em critérios europeus. São apresentados os cálculos para determinar a quantidade e a localização dos postos de recarga, considerando a extensão das rodovias estaduais e federais. Além disso, é discutido o estudo de fluxo de potência e a montagem do caso base para simulações.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados das simulações de fluxo de potência realizadas com o software ANAREDE, avaliando o impacto da inserção de carregadores de veículos elétricos na rede elétrica de Pernambuco. São analisados os cenários de operação normal (N) e contingência (N-1), com foco no carregamento dos transformadores das subestações de fronteira. O capítulo também discute os parâmetros elétricos, como resistência e reatância equivalente dos transformadores, e sua influência no carregamento desses equipamentos.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, destacando os principais desafios e limitações identificadas na integração da mobilidade elétrica à rede elétrica de Pernambuco. São propostas diretrizes para o reforço da infraestrutura elétrica e sugestões para trabalhos futuros, visando a melhoria contínua do sistema e a preparação para a expansão da frota de veículos elétricos.

## **2 ELETROMOBILIDADE NO CONTEXTO DE DESCARBONIZAÇÃO**

A transição energética e a eletromobilidade têm se destacado como pilares fundamentais para a descarbonização do setor de transportes, um dos maiores emissores de gases de efeito estufa globalmente. A adoção de veículos eletrificados é considerada uma das principais estratégias para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e reduzir os impactos ambientais do transporte rodoviário [1].

Os veículos elétricos estão desempenhando um papel crucial na transformação do setor de transportes, impulsionados por avanços tecnológicos, políticas governamentais de incentivo e pela crescente conscientização sobre a necessidade de reduzir as emissões de carbono [1]. Em 2024, estima-se que mais de 11,6 milhões de carros eletrificados foram vendidos globalmente, com a China liderando o mercado [2]. No Brasil, em 2024, foram comercializados cerca de 177 mil EVs, mostrando um crescimento de 88,8% em relação ao ano de 2023 [3].

A adoção de EVs e a implementação de infraestrutura de recarga elétrica são elementos-chave para alcançar uma maior descarbonização do sistema de transporte. Isso porque os EVs são mais eficientes em termos de energia, não geram poluição local e podem operar com menor consumo de combustível [4].

### **2.1 Veículos Elétricos**

Os carros elétricos têm uma história rica e complexa que remonta ao século XIX. Desde suas primeiras aparições até o renascimento moderno, os EVs passaram por várias fases de desenvolvimento e declínio, influenciadas por avanços tecnológicos, mudanças de mercado e questões ambientais.

Os primeiros carros elétricos surgiram no final do século XIX, com invenções significativas como o acidentalmente descoberto motor elétrico de corrente contínua de Zenobe Gramme na França em 1873 e a bateria recarregável de chumbo-ácido desenvolvida por Gaston Plante, mas que foi aperfeiçoada por Camille Alphonse Faure em 1881, e isso se tornou fundamental para o desenvolvimento inicial dos veículos elétricos. Tais fatores resultaram na criação do Flocken Elektrowagen, carro

elétrico de Flocken, em homenagem ao seu criador Andreas Flocken, reconhecido como o primeiro veículo elétrico, demonstrado na Figura 1 [5][6][7].

Figura 1 - Reconstrução do primeiro veículo elétrico do mundo.



Fonte: Retirado de [8].

Durante a chamada "era de ouro" dos veículos elétricos, entre 1895 e 1905, os EVs eram populares, especialmente nos Estados Unidos, onde representavam cerca de 38% do mercado automobilístico. [6]

O declínio dos carros elétricos começou na segunda década do século XX, quando os motores de combustão interna ganharam popularidade devido a avanços tecnológicos, como o motor de arranque elétrico, a produção em massa de veículos à gasolina mais baratos e a vantagem de uma maior autonomia por parte dos veículos à combustão. [6][9]

Os desafios enfrentados pelos veículos elétricos incluíam limitações na tecnologia de baterias, infraestrutura inadequada para recarga e percepções culturais que consideravam os EVs menos robustos. No entanto, ofereciam vantagens como

maior confiabilidade, menos ruído e poluição, o que os tornava uma alternativa atraente em comparação aos veículos de combustão interna [10].

Ao contrário dos veículos tradicionais, que dependem de motores de combustão interna que queimam combustíveis fósseis, os motores elétricos utilizam eletricidade, que é armazenada em baterias recarregáveis. Essas baterias, geralmente compostas por íons de lítio, são carregadas por fontes de energia elétrica e alimentam o motor que impulsiona o veículo [11].

Carros elétricos têm uma eficiência energética muito maior que os veículos convencionais. Isso ocorre porque os motores elétricos convertem uma maior proporção da energia armazenada em movimento, ao passo que os motores a combustão perdem grande parte da energia em forma de calor. Essa alta eficiência contribui para a redução do consumo de energia e, conseqüentemente, para a diminuição de custos operacionais [11].

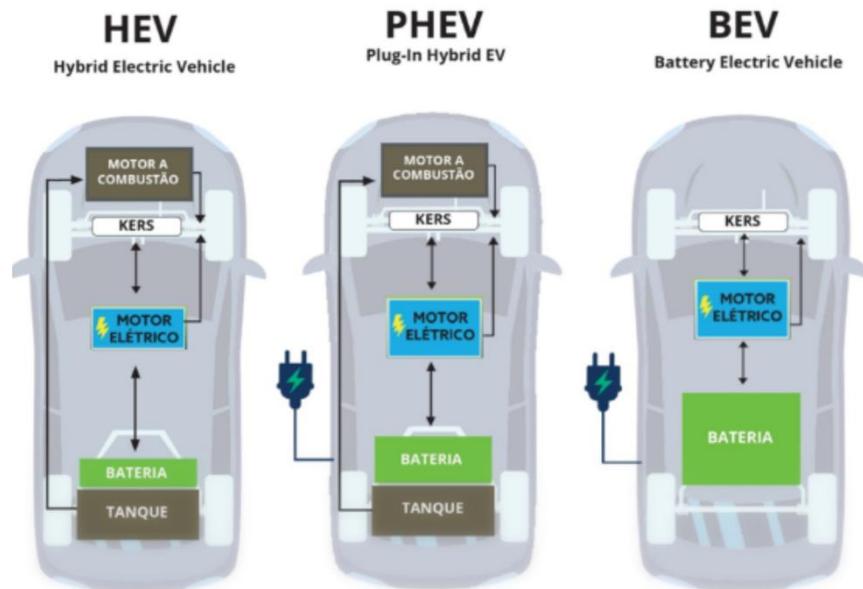
Apesar de seus benefícios, a transição para carros elétricos enfrenta desafios, especialmente em relação à infraestrutura de recarga e à autonomia dos veículos. As estações de recarga precisam ser amplamente distribuídas para garantir que os motoristas possam recarregar suas baterias com facilidade, mas a falta de estações de carregamento acessíveis é um obstáculo significativo para a adoção de EVs [12].

Os altos custos associados à instalação e manutenção das estações de carregamento também são um desafio, especialmente em países em desenvolvimento [13] [14]. Além disso, a integração de EVs na rede elétrica pode sobrecarregar a infraestrutura existente, exigindo melhorias na capacidade e estabilidade da rede [15] [16] [17].

## **2.2 Tipos de veículos Eletrificados**

Existem diferentes tipos de veículos eletrificados, cada um com características e sistemas de propulsão distintos. Os três principais tipos em circulação no Brasil, demonstrados na Figura 2, incluem: HEV, PHEV e BEV.

Figura 2 – principais tipos de veículos elétricos no Brasil.



Fonte: Adaptado de [18].

### 2.2.1 Veículo Elétrico à Bateria (BEV – Battery Electric Vehicle)

Os Veículos Elétricos à Bateria (BEV, Battery Electric Vehicle) são movidos exclusivamente por motores elétricos, alimentados por baterias recarregáveis. Não possuem motor a combustão, o que significa que são totalmente dependentes de eletricidade para a operação. Eles não emitem gases de escape durante a operação, tornando-os uma opção ambientalmente amigável, especialmente quando a eletricidade utilizada é gerada a partir de fontes renováveis. No entanto, a autonomia limitada, o tempo de recarga relativamente longo torna a utilização desse tipo de EV, em viagens longas, altamente dependentes de uma infraestrutura de carregamento nas rodovias. Compõem atualmente cerca de 28% de todos os carros eletrificados em território brasileiro [19] [20].

### 2.2.2 Veículo Elétrico Híbrido (HEV - Hybrid Electric Vehicle)

Os Veículos Híbridos Elétricos (HEV, Hybrid Electric Vehicle) representam uma tecnologia intermediária entre os veículos convencionais, movidos exclusivamente por

combustão interna (MCI), e os veículos totalmente elétricos. Combinando um motor a combustão interna e um motor elétrico, os HEVs buscam otimizar a eficiência energética e reduzir emissões poluentes. Os híbridos não dependem de pontos de recarga [20].

Ainda de acordo com [20] a principal característica dos HEVs é a incapacidade de recarregar as baterias por meio de fontes externas, como tomadas ou eletropostos. Em vez disso, a energia elétrica é gerada internamente pelo próprio veículo, seja por meio da frenagem regenerativa (que converte energia cinética em elétrica durante a desaceleração) ou pelo uso do MCI como gerador. Essa autonomia energética torna os HEVs uma solução prática para regiões com pouca infraestrutura de recarga.

O funcionamento de um HEV baseia-se na sinergia entre os dois motores, gerenciada por um sistema de controle eletrônico. A atuação de cada componente varia conforme as condições de condução:

- Em baixas velocidades ou arrancadas: O motor elétrico assume a propulsão principal, reduzindo o consumo de combustível e as emissões em situações em que o MCI é menos eficiente.
- Em velocidades mais altas ou demanda elevada de potência: O MCI entra em operação, enquanto o motor elétrico atua como auxiliar, complementando a potência quando necessário.

Essa combinação permite que os HEVs alcancem maior eficiência energética em comparação aos veículos convencionais, além de reduzirem significativamente o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub>. Atualmente compõem cerca de 35% da frota nacional de veículos elétricos.[19] [21]

### **2.2.3 Veículos Híbridos PLUG-IN (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle)**

Os Veículos Híbridos *Plug-in*(PHEV, *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) também combinam motores elétricos e a combustão, mas têm a capacidade de recarregar suas baterias externamente, permitindo que sejam conduzidos em modo totalmente elétrico por distâncias mais curtas, antes de o motor a combustão assumir. Oferecem a flexibilidade de operar tanto em modo elétrico quanto híbrido, aumentando a

autonomia e permitindo que o motorista utilize o motor a combustão quando necessário. Suas desvantagens incluem o custo mais elevado, resultado da combinação de dois sistemas, e a possibilidade de exigir manutenção mais complexa devido à presença dos dois motores. Atualmente a participação total no mercado brasileiro é de 35% [19] [21] [22].

### **2.3 Baterias**

As baterias, principalmente de íon-lítio, são o principal meio de armazenamento de energia em veículos eletrificados. Elas são projetadas para oferecer alta densidade de energia e eficiência de carga/descarga, sendo críticas para a autonomia e desempenho do veículo. Nos BEVs e PHEVs, a bateria armazena energia elétrica, enquanto nos HEVs, ela auxilia na recuperação de energia durante frenagens [4]. Ao longo do tempo, as baterias evoluíram para tecnologias mais eficientes e com maior capacidade de armazenamento, refletindo as necessidades da sociedade moderna, como no caso das baterias recarregáveis e as de íons de lítio, predominantes atualmente.

Os parâmetros de capacidade nominal, tensão e corrente máxima de descarga são fundamentais para a análise e otimização do desempenho de baterias, com diferentes modelos e métodos de carga/descarga influenciando a capacidade, resistência interna e eficiência de armazenamento de energia. A definição dos parâmetros pode ser encontrada a seguir [23]:

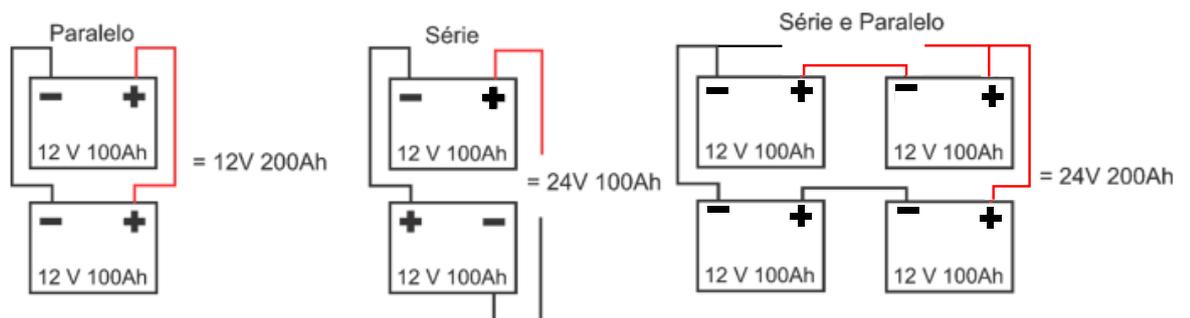
- Capacidade nominal: Medida em ampere-horas (Ah) ou miliampere-horas (mAh), indica a quantidade de carga que a bateria pode armazenar e fornecer. Quanto maior a capacidade, maior o tempo de operação.
- Tensão: A tensão nominal de uma célula de bateria é determinada pelo material do eletrodo e o tipo de eletrólito.
- Corrente máxima de descarga: Refere-se à quantidade máxima de corrente que a bateria pode fornecer sem danificar seus componentes internos. Este parâmetro é crucial para dispositivos que demandam picos de alta corrente, como ferramentas elétricas e veículos elétricos.

- Ciclos de carga/descarga: Este parâmetro determina quantas vezes uma bateria pode ser recarregada antes de sua capacidade de retenção de energia diminuir significativamente.

Para o dimensionamento de um acumulador em um veículo elétrico, pode ser necessário utilizar associações de células em série e/ou em paralelo. Na associação em série, a tensão total do sistema corresponde à soma das tensões individuais das células, enquanto a capacidade nominal permanece inalterada [23].

Por outro lado, na associação em paralelo, a tensão do sistema se mantém igual à de uma única célula, mas a capacidade nominal é aumentada, resultando em uma maior capacidade de armazenamento de energia, como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Associação série e paralelo



Fonte: Autoria própria

### 2.3.1 Tipos de Baterias

As baterias, desde suas primeiras invenções, têm sido utilizadas no desenvolvimento de tecnologias móveis e de armazenamento de energia. O primeiro dispositivo considerado uma bateria foi a pilha de Volta, criada em 1800 por Alessandro Volta, essa pilha foi baseada em reações de oxirredução e que pode promover uma corrente elétrica a um circuito. [24]

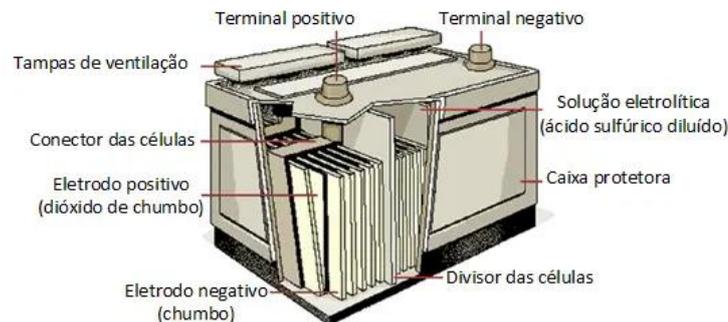
Em 1859, Gaston Plante criou o primeiro sistema recarregável de chumbo-ácido, que se destacou como um dos acumuladores mais bem-sucedidos de todos os tempos. Sua invenção impulsionou o avanço das baterias secundárias, levando ao desenvolvimento de modelos reutilizáveis, como as de níquel e alcalinas. [25]

Ao longo do tempo, as baterias evoluíram para tecnologias mais eficientes e com maior capacidade de armazenamento, refletindo as necessidades da sociedade moderna, como no caso das baterias recarregáveis e as de íons de lítio, predominantes atualmente.

### 2.3.1.1 Baterias de Chumbo-Ácido

Uma das mais antigas e utilizadas, principalmente em carros e sistemas de energia estacionária. Ela utiliza chumbo e dióxido de chumbo como eletrodos, com uma solução de ácido sulfúrico como eletrólito, como representada na Figura 4. Apesar de seu custo relativamente baixo, as baterias de chumbo-ácido têm menor eficiência e vida útil limitada [26].

Figura 4 - Características da bateria de chumbo ácido.



Fonte: Retirado de [27]

### 2.3.1.2 Baterias de Lítio

Uma das tecnologias mais recentes e amplamente usadas, especialmente em dispositivos portáteis e veículos elétricos, como representada na Figura 5. As baterias de íons de lítio têm alta densidade energética, durabilidade e leveza. Elas são mais eficientes e têm maior capacidade de carga, comparadas com outras tecnologias [26].

Essas baterias são formadas por células agrupadas em módulos e posteriormente em packs que podem variar de acordo com o modelo e tipo do veículo.

Existem diferentes tipos de baterias de lítio, como:

- Lítio cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ): Comumente usada em eletrônicos portáteis são compostas por óxido de cobalto que funciona como cátodo e carbono grafite como ânodo, no entanto apresenta vida útil limitada [28].
- Lítio ferro fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ): Usada em veículos elétricos, mais estável e segura. Apresenta longa vida útil e uma menor densidade energética. [28]
- Lítio manganês ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ): Com boa estabilidade térmica e maior vida útil, apresenta menor custo sendo usada em veículos elétricos e híbridos, no entanto tende a perder a capacidade ao longo do tempo.

Figura 5 - Bateria de lítio de EV



Fonte: Retirado de [29].

#### 2.3.1.3 Bateria de Níquel-Cádmio (NiCd)

Embora tenha sido popular em aplicações como ferramentas portáteis e câmeras, seu uso tem diminuído devido à baixa densidade energética e aos problemas ambientais relacionados ao cádmio [28].

#### 2.3.1.4 Bateria de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH)

Uma evolução da bateria NiCd. A maior diferença em relação a de NiCd é que, este tipo de bateria, utiliza hidrogênio retido em uma liga metálica na forma de hidreto para compor o eletrodo negativo ao invés de cádmio [30][31]. Embora tenha maior capacidade, sua performance ainda é inferior à das baterias de lítio [26].

## **2.4 Carregadores AC/DC**

Os carregadores internos, presentes em alguns tipos de EVs, são responsáveis por converter a energia da rede elétrica em energia armazenável nas baterias. Eles podem ser de carregamento condutivo ou indutivo, com diferentes níveis de potência [32]. Nos BEVs e PHEVs, o carregador interno converte corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC), que é usada para carregar as baterias. A transição para a mobilidade elétrica depende não apenas da evolução tecnológica dos veículos, mas também do desenvolvimento de uma infraestrutura de recarga eficiente e acessível. Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA) [33], a expansão dos carregadores está intimamente ligada ao crescimento das vendas de EVs, exigindo investimentos contínuos e planejamento estratégico para atender à demanda global.

### **2.4.1 Tipos de Carregadores**

A infraestrutura de recarga divide-se em duas categorias principais, conforme velocidade e potência: Carregadores AC e carregadores DC.

#### **2.4.1.1 Carregadores AC – Corrente Alternada**

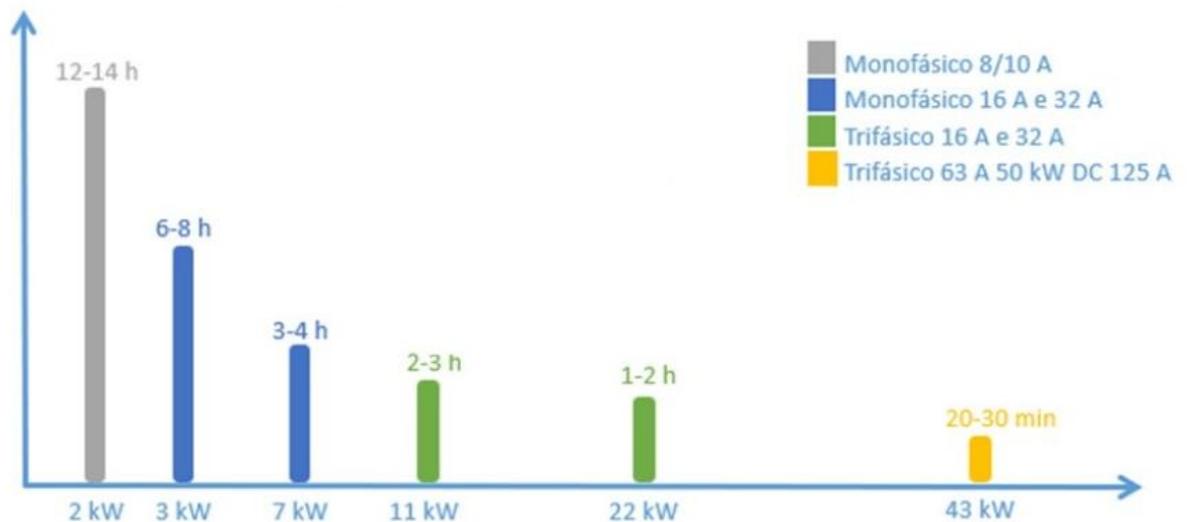
Carregadores lentos (AC), são utilizados predominantemente em residências ou locais de estacionamento prolongado, operam entre 3,7 kW e 22 kW, representados na Figura 6. São ideais para recarga noturna, mas demandam maior tempo para carga completa. O tempo de recarga de um veículo elétrico depende da capacidade da bateria, da potência do carregador e da eficiência com que o sistema de carregamento do veículo consegue aproveitar essa potência. Em residências brasileiras, esse processo pode variar de aproximadamente 4 a 12 horas para uma recarga completa de 0% a 100%, como demonstrado na Figura 7 [34].

Figura 6 - Carregador AC 22 kW.



Fonte: Retirado de [35]

Figura 7 - Tempo de recarga por potência dos carregadores AC.



Fonte: Retirado de [34].

Os carregadores AC operam através de etapas de conversão e regulação. Primeiramente, um transformador reduz a tensão da rede, que está geralmente em 110V ou 220V, para níveis compatíveis com o dispositivo. Em seguida, um circuito retificador converte a corrente alternada em pulsante, que é filtrada por capacitores para suavizar a onda [36]. Ainda de acordo com [33], em 2023 a quantidade de carregadores lentos no mundo era de 1,84 milhão, com a China liderando com mais

55% de todos os dispositivos desse tipo. O Brasil possui 12397 eletropostos de corrente AC, de acordo com [37].

#### 2.4.1.2 Carregadores DC – Corrente contínua

Os carregadores de corrente contínua (DC), representados na Figura 8, desempenham um papel essencial na infraestrutura de recarga dos EVs, proporcionando carregamento rápido e eficiente. Esses dispositivos são amplamente utilizados em estações de recarga rápida e rodovias, permitindo que os motoristas reabasteçam suas baterias em um curto período em relação aos carregadores AC [38].

Figura 8 - Carregador DC 150 kW



Fonte: Retirado de [39].

Diferentemente dos carregadores de corrente alternada (AC), os carregadores DC fornecem eletricidade diretamente na forma de corrente contínua para a bateria

do veículo, eliminando a necessidade de conversão dentro do próprio carro. Essa abordagem resulta em tempos de recarga significativamente reduzidos [38].

Os carregadores DC podem ser classificados em diferentes potências:

- Carga rápida (50 kW a 150 kW): Comum em centros urbanos e rodovias, permite recarga de 80% da bateria em aproximadamente 30 minutos.
- Carga ultrarrápida (acima de 150 kW): Usada em estações de alto desempenho, capaz de carregar vários veículos simultaneamente com tempos de recarga ainda mais reduzidos [40].

De acordo com [33], em 2023 existiam cerca de 1,39 milhão de carregadores rápidos no mundo, a China domina o mercado com 1,20 milhão instalados no país. De acordo com [37], o Brasil possui atualmente 2430 estações de recarga rápida. No entanto, em Pernambuco, há apenas 15, todas localizadas na cidade do Recife.

### 3 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Para que o uso de veículos elétricos seja realmente sustentável, é essencial que a eletricidade utilizada na recarga desses veículos provenha de fontes que minimizem impactos ambientais. A matriz elétrica brasileira é uma das mais diversificadas do mundo. Parte dessa diversificação deve-se ao fato de que o Brasil possui uma localização geográfica privilegiada, com regiões úmidas ricas em rios, e regiões secas com alto incidência de irradiação solar e ventos.

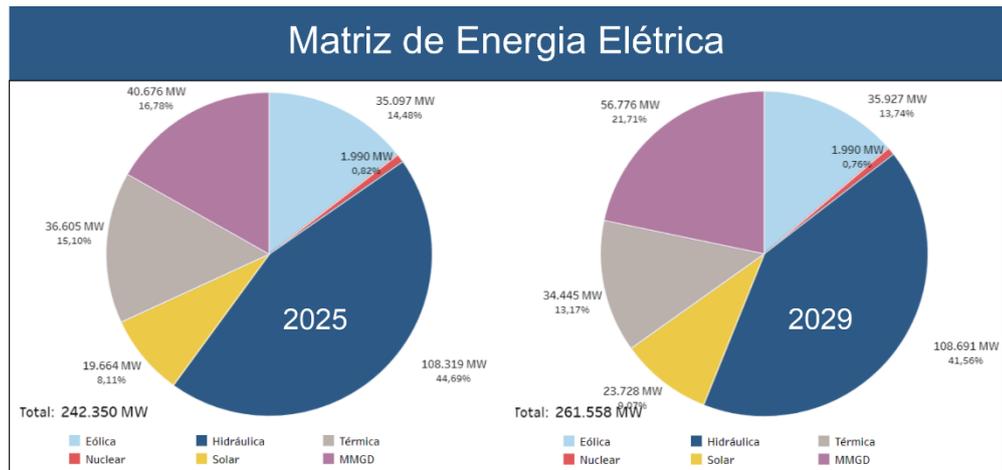
Por ser um país hidrologicamente rico, a fonte renovável de energia que contribui para a maior parcela de eletricidade gerada é a hidrelétrica. Em 2025 cerca de 108 GW de potência instalada provem de usinas hidrelétricas de grande e de pequeno porte [41].

Esse tipo de geração utiliza máquinas girantes com elevada inércia rotativa, o que garante uma boa estabilidade de frequência devido a energia cinética armazenada no rotor dessas máquinas. As Usinas Hidrelétricas (UHEs) são despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que leva em consideração critérios econômicos, operacionais e ambientais [42].

No entanto, o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) que anteriormente possuía em sua matriz elétrica uma participação maior do que 50% de hidrelétricas, apresenta em 2025 uma parcela de 44% de potência instalada de geração, com previsão de que em 2029 sua contribuição no montante total se reduza para 41%, como representado na Figura 9.

Essa redução deve-se ao crescimento de outras fontes renováveis, como eólica e fotovoltaica, impulsionadas pela transição energética global e pela redução de custos tecnológicos. Somadas à Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), essas fontes variáveis representam atualmente 39,30% da matriz [41].

Figura 9 - Matriz elétrica nacional em 2025 e 2029.



Fonte: Adaptado de [41].

### 3.1 Sistema Interligado Nacional

De forma a aproveitar a diversidade energética brasileira e garantir mais robustez ao sistema, a malha de transmissão do SEB é interligada [41]. Operar o sistema de maneira interligada significa mais robustez e melhores condições no atendimento à demanda. O Sistema Interligado Nacional é responsável por equilibrar as disparidades sazonais e geográficas do país. Enquanto o Sul e o Sudeste possuem períodos de seca que afetam a geração hidrelétrica, o Norte e o Nordeste podem compensar essa lacuna com suas reservas hídricas ou outras fontes, garantindo estabilidade ao suprimento energético.

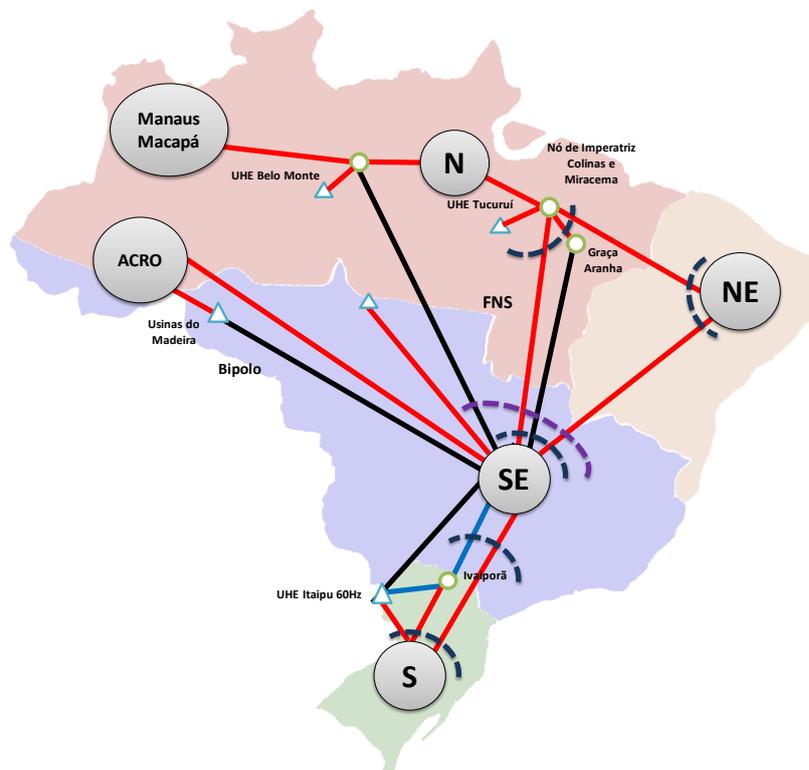
O SIN é segmentado em quatro subsistemas que refletem as particularidades de cada macrorregião, Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), Nordeste (NE), Norte (N) e Sul(S) [42], como representado na Figura 10. Essa divisão facilita a gestão de recursos naturais: áreas com abundância hidrológica, como a região Sul, complementam regiões com maior potencial eólico ou solar, como o Nordeste. A transferência de energia entre essas zonas é viabilizada por linhas de transmissão de alta capacidade, que atuam como "artérias" do sistema.

Essa dinâmica não só maximiza o uso de fontes renováveis, mas também reduz custos operacionais, pois evita a necessidade de acionar termelétricas em momentos de escassez daquele subsistema. A expansão de fontes variáveis, como eólica e

solar, introduziu novos desafios à operação do SIN. O Nordeste, por exemplo, tornou-se um polo de geração eólica e solar, exigindo uma maior capacidade das linhas de transmissão para escoar o excedente produtivo.

O ONS gerencia esses fluxos por meio de limites operacionais, definidos conforme a capacidade técnica das infraestruturas. Esses limites, no entanto, são dinâmicos: à medida que novas usinas e linhas são incorporadas, o ONS reavalia parâmetros para evitar sobrecargas e manter a segurança do sistema. Em cenários críticos, como falhas abruptas em grandes geradores ou flutuações perigosas na frequência da rede, o SIN conta com mecanismos automáticos de proteção, e instruções de operação presentes em [42]. Um deles é o seccionamento controlado, que isola subsistemas afetados para conter distúrbios e preservar o restante da rede. Essa funcionalidade é vital em um país continental como o Brasil, onde eventos climáticos extremos ou falhas técnicas podem comprometer regiões inteiras se não houver resposta imediata.

Figura 10 - Subsistemas elétricos do SIN.



Fonte: Autoria própria.

### **3.1.1 Instalações de Transmissão**

O SIN é regulamentado por diretrizes técnicas e operacionais estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que organizam as infraestruturas de transmissão de energia elétrica. Essas instalações, geridas por empresas autorizadas pela União por meio de outorgas, são categorizadas em Rede Básica (RB), Demais Instalações de Transmissão (DIT) e Interligações Internacionais de Transmissão (ITI). Apesar de serem categorizadas de forma independente, as interligações internacionais são submetidas aos mesmos padrões técnicos e comerciais que regem a Rede Básica. Essa equiparação regulatória garante que, embora tenham finalidades específicas, essas estruturas sigam diretrizes operacionais e tarifárias equivalentes às aplicadas às instalações da RB [43]. Nesse contexto, esse texto focará apenas na rede básica e demais instalações de transmissão.

#### **3.1.1.1 Rede Básica**

A RB é parte fundamental do SIN, com uma malha de transmissão totalizando 171.640 km em 2025 [41]. A sua importância está em assegurar a estabilidade operacional e a segurança energética do país. A RB atua como uma peça motriz para equilibrar a balança entre a geração e a carga, mitigando eventuais desequilíbrios que possam levar a variações de frequência e interrupções no fornecimento. Ao permitir uma gestão eficiente dos recursos, ela também contribui para a otimização da capacidade instalada, direcionando energia de regiões com excedente para aquelas com déficit. Outro aspecto fundamental é sua capacidade de integração tecnológica, pois interliga usinas hidrelétricas, parques eólicos, complexos solares e termelétricas, consolidando a diversidade da matriz brasileira e reduzindo a dependência de uma única fonte. A RB faz parte do sistema de transmissão, que se diferencia da rede de distribuição, responsável pelo fornecimento de energia em média e baixa tensão aos consumidores finais. Ainda de acordo com [44], equipamentos que operam em tensão igual ou superior a 230 kV podem integrar a Rede Básica, incluindo linhas de transmissão, transformadores de potência e seus respectivos enrolamentos secundário e/ou terciário, mesmo que estes operem em tensões inferiores a 230 kV, desde que o enrolamento primário esteja em 230 kV ou mais.

### *3.1.1.2 DIT – Demais Instalações da Transmissão*

As DITs englobam infraestruturas que, apesar de exercerem funções de transmissão, não integram a rede básica do SIN. São essenciais para viabilizar a conexão de unidades geradoras ao SIN e garantir o fornecimento de energia elétrica a grandes consumidores. De acordo com os critérios normativos presentes em [44], são classificadas como DITs as instalações que atendem a requisitos específicos, tais como linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação utilizados por centrais geradoras ou consumidores em caráter exclusivo ou compartilhado, sem restrição em relação ao nível de tensão e infraestruturas de transmissão, operando em tensões inferiores a 230 kV, mesmo quando localizadas dentro de subestações da RB.

#### **4 CRITÉRIOS DE EXPANSÃO DE POSTOS DE RECARGA E MODELAGEM DAS CARGAS PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO**

Uma das principais vantagens dos veículos a combustão é a rapidez no abastecimento do tanque e a ampla disponibilidade de postos de combustível nas rodovias nacionais. Como consequência, o trânsito entre cidades, estados ou até mesmo países torna-se viável. No caso dos veículos eletrificados, especialmente os BEVs o deslocamento intermunicipal já se configura como um desafio. A distribuição desigual de postos de recarga, muitas vezes concentrados apenas em grandes centros urbanos, o tempo prolongado de carregamento e as filas frequentes são fatores que dificultam viagens de longa distância para esses veículos. Tais obstáculos desestimulam a maioria dos consumidores na hora de escolher um automóvel novo [45].

Por outro lado, a possibilidade de carregar o veículo em casa e o custo reduzido da energia elétrica em comparação com etanol e gasolina tornaram os BEVs populares entre motoristas de aplicativo em grandes cidades. Empresas criaram categorias exclusivas para esse tipo de veículo em suas plataformas, incentivando a migração para modelos eletrificados [46]. Com a gasolina em 2025 custando em média R\$ 6,31, o kWh residencial custando R\$ 0,77 e kWh de recarga rápida custando R\$ 2,25 é possível realizar a comparação entre os dados Tabela 1 e Tabela 2, onde RDC indica que os valores foram calculados considerando o custo da recarga rápida e RAC considerando os custo da recarga residencial [47].

A comparação mostra que mesmo o cenário mais caro para os EVs ainda é mais barato do que o custo por km rodado dos carros à combustão.

Tabela 1 - Custo por km rodado de carros à combustão.

Modelo	Capacidade do tanque	Consumo urbano	Autonomia (km)	Tanque cheio	Custo por km rodado
Fiat Pulse Hybrid 1.0T	48 litros	10,2 km/l	489,6 km	R\$ 302,88	R\$ 0,62
Hyundai Creta 1.6T	50 litros	8,9 km/l	445 km	R\$ 315,50	R\$ 0,71
Chevrolet Onix 1.0	44 litros	13,9 km/l	611,6 km	R\$ 277,64	R\$ 0,45

Fonte: Retirado de [47].

Tabela 2 - Custo por km rodado de EVs

Modelo	Capacidade da bateria	Consumo urbano	Autonomia	Bateria cheia (RDC ou RAC)	Custo por km (RDC/RAC)
Kwid E-Tech	26,8 kWh	9,4 km/kWh	251,9 km	R\$ 60,30 ou R\$ 20,64	R\$ 0,24 ou R\$ 0,08
BYD Dolphin Mini	38,8 kWh	9,5 km/kWh	368,6 km	R\$ 87,30 ou R\$ 29,88	R\$ 0,24 ou R\$ 0,08
GWM Ora GT	63,1 kWh	6,6 km/kWh	416,5 km	R\$ 142 ou R\$ 48,59	R\$ 0,34 ou R\$ 0,12
Volvo EX30	69 kWh	6,3 km/kWh	434,7 km	R\$ 155,25 ou R\$ 53,13	R\$ 0,36 ou R\$ 0,12

Fonte: Adaptado de [47].

Logo, para viabilizar o trânsito entre cidades e impulsionar a popularização dos carros elétricos, é essencial desenvolver uma infraestrutura de recarga que permita o deslocamento de veículos leves e comerciais entre os extremos do estado de Pernambuco.

Este capítulo tem como objetivo propor uma metodologia para dimensionar uma infraestrutura mínima de recarga para veículos eletrificados, determinando potência instalada, tipos e quantidade de carregadores.

#### **4.1 Metodologia europeia para expansão da rede de carregamento e popularização de veículos elétricos**

A transição para a mobilidade elétrica é um dos principais tópicos nas políticas de descarbonização de todo o mundo. Nesse contexto, a União Europeia por meio do pacote “*Fit for 55*” [48], anunciou uma regulamentação sobre a implantação de pontos de carregamento acessíveis ao público para veículos elétricos, visando garantir cobertura mínima, acessibilidade e padronização técnica [49]. A rede principal da RTE-T, estrada que conecta regiões estratégicas do continente, exige dos Estados-Membros a implementação de plataformas de carregamento com distância máxima de 60 km entre si, em cada sentido de circulação.

Os prazos e especificações técnicas são escalonados para permitir adaptação gradual onde é esperado que até 2025, cada plataforma deve oferecer potência total mínima de 400 kW, incluindo pelo menos um ponto de carregamento individual de 150 kW, ou seja, um carregador DC [49]. Tal requisito é para evitar que uma estação de recarga possua 8 carregadores de 50 kW, se distanciando da premissa de carregadores mais rápidos nas estradas. E em 2027 espera-se que a potência total por plataforma deve atingir 600 kW, com dois pontos de 150 kW cada [49].

Esse incremento reflete a expectativa de maior demanda e a necessidade de reduzir tempos de espera, alinhando-se ao crescimento projetado da frota elétrica. Ainda de acordo com [49], para veículos comerciais na RTE-T foi proposto a potência mínima de 350 kW em um carregador individual a cada 60 km, já para as demais rodovias da União Europeia, um ponto de carregamento a cada 100 km.

#### **4.2 Adaptando a metodologia para o estado de Pernambuco**

O estado de Pernambuco, localizado no Nordeste do Brasil, faz fronteira com cinco estados: Paraíba, Ceará, Piauí, Bahia e Alagoas. Seu território é dividido em cinco mesorregiões, todas marcadas por polos comerciais e centros de desenvolvimento estratégicos. Dentre as principais rotas econômicas, destaca-se o eixo Recife-Petrolina, com aproximadamente 710 km de extensão. Esse corredor logístico atravessa quase todo o território pernambucano, conectando cidades importantes como Arcoverde e Caruaru, e culmina na divisa com a Bahia. Além de

impulsionar o comércio regional, a rota integra atividades agrícolas, industriais e de serviços, consolidando-se como um vetor de crescimento para o estado [50] [51].

A eletrificação do trecho Recife-Petrolina surge como um passo estratégico para impulsionar o desenvolvimento sustentável de Pernambuco e fortalecer sua posição como polo logístico do Nordeste. Com seus 710 km conectando regiões produtivas, a implementação de infraestrutura para veículos elétricos, aproveitando-se do enorme número de usinas de energias renováveis no Nordeste, traria benefícios em diferentes áreas. A eletrificação viabilizaria o transporte de carga mais eficiente e de menor custo, fortalecendo o escoamento de produtos agrícolas do Vale do São Francisco, como frutas irrigadas [50], e de bens industriais do Grande Recife [51]. Isso aumentaria a competitividade do estado em mercados nacional e internacional, atraindo investimentos em tecnologia e logística verde.

Porém, para democratizar o acesso à energia elétrica, é de suma importância que a infraestrutura de recarga possa abranger todas as rodovias pavimentadas do estado. De acordo com [52], foi possível realizar o levantamento do comprimento de toda rede rodoviária pavimentada do estado, presente na Tabela 3. É crucial destacar, porém, que esse cálculo abrange apenas as vias interestaduais e interurbanas, excluindo trechos urbanos.

Tabela 3 - Extensão das rodovias estaduais e federais no estado de Pernambuco.

Rodovias Estaduais	
Pista Simples (km)	5759,18
Pista duplicada (km)	184,94
Pista triplicada (km)	11,15
Já pavimentadas (km)	Em pavimentação (km)
5955,27	122,04
<b>Total (km)</b>	<b>6077,31</b>

Fonte: Adaptado de [52].

Para dimensionar corretamente o número de postos de recarga (PR), é importante levar em consideração que os trechos que contém pistas duplicadas e triplicadas deverão conter estações em ambos os lados da rodovia. Logo, o cálculo do número mínimo de postos, de acordo com [49] para veículos leves é dado por:

$$N_{postos} = \left\lceil \frac{\text{Extensão da rodovia (km)}}{60} \right\rceil \quad (4.1)$$

Ao aplicar a duplicação e triplicação das vias existentes, incorporando esses incrementos ao comprimento total registrado na Tabela 3, e substituindo os valores na equação (4.1), obtém-se um total de 105 postos de recarga para veículos leves distribuídos em todo o estado de Pernambuco. Especificamente, para o trecho Recife - Petrolina, que abrange 710 km, são projetados 15 carregadores exclusivos para veículos comerciais. Quanto às demais rodovias estaduais, o dimensionamento de estações para veículos de carga segue o seguinte critério:

$$N_{postos\ comerciais} = \left\lceil \frac{\text{Extensão da rodovia (km)}}{100} \right\rceil \quad (4.2)$$

Subtraindo a extensão da rota RE-PET (Recife - Petrolina) do total de quilômetros e aplicando esse ajuste à equação (4.2), obtém-se 54 plataformas de carregamento dedicadas a veículos de carga e serviços, o que eleva o total para 174 estações de recarga.

A normativa [49] estabelece que as estações para automóveis devem oferecer potência total de 400 kW, enquanto as destinadas a veículos de carga requerem 350 kW. Com base nesses parâmetros é possível calcular tanto a quantidade necessária de carregadores quanto a demanda energética total, valores presentes na Tabela 4. O valor de fator de potência considerado foi de 0,98, padrão adotado pela maioria dos fabricantes

Tabela 4 - Quantidade de Postos de recargas x Carga

	Quantidade PR	Carga (MW)
Veículos Leves	105	42
Veículos Comerciais	69	24,15
Total	174	66,15

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Estudo de Fluxo de Potência

A análise do fluxo de potência é uma ferramenta indispensável para a operação e planejamento de sistemas elétricos, permitindo avaliar o equilíbrio entre geração e demanda, distribuição de potência ativa e reativa, e condições operacionais da rede. A análise consiste em resolver um sistema de equações não lineares derivadas das leis de Kirchhoff, visando determinar as tensões nodais, fluxos de potência ativa e reativa, e perdas no sistema. O resultado dessa ferramenta é uma imagem estática do sistema, ou seja, em regime permanente, ignorando completamente o regime transitório [53].

As equações fundamentais utilizadas na modelagem do fluxo de potência baseiam-se na conservação de potência ativa e reativa nos nós da rede, onde a potência líquida injetada deve ser compatível com as potências que fluem pelos componentes internos. Isso se fundamenta na primeira lei de Kirchhoff, enquanto a segunda lei de Kirchhoff permite relacionar as quedas de tensão aos estados dos terminais da rede [53].

Segundo afirma [53], o problema do fluxo de potência é definido por quatro variáveis principais em cada barra ( $k$ ) da rede:

- $V_k$  – Magnitude da tensão nodal;
- $\Theta_k$  – Ângulo da tensão nodal;
- $P_k$  – *Geração líquida de potência ativa*;
- $Q_k$  – Injeção líquida de potência reativa.

A resolução de equações não lineares se dá por meio de métodos iterativos, por isso, é necessário conhecer ao menos duas das incógnitas. Devido a essa restrição as barras são classificadas conforme seus parâmetros conhecidos:

- Barras PQ: Potência ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ) constantes, representando cargas;
- Barras PV: Potência ativa ( $P$ ) e magnitude de tensão ( $V$ ) constantes, associadas a geradores;
- Barra  $V\theta$ : Tensão ( $V$ ) e ângulo ( $\theta$ ) fixos, servindo como referência para o sistema.

As equações do fluxo de potência derivam da Primeira Lei de Kirchhoff, garantindo o balanço de potência em cada nó [Monticelli]. Para cada barra  $k$ , tem-se:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (4.3)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (4.4)$$

Onde, de acordo com [53]:

- $k = 1, \dots, n$ , sendo  $n$  o número de barras da rede;
- $\Omega_k$  = conjunto das barras vizinhas da barra  $k$ ;
- $V_k, V_m$  = Magnitude das tensões das barras terminais do ramo  $k - m$ ;
- $\theta_k, \theta_m$  = ângulos das tensões das barras do ramo  $k - m$ ;
- $P_{km}$  = fluxo de potência ativa no ramo  $k - m$ ;
- $Q_{km}$  = fluxo de potência reativa no ramo  $k - m$ ;
- $Q_k^{sh}$  = injeção direta de potência reativa na barra  $k$  por meio de elemento shunt.

Por fim, o sistema resultante é não linear e resolvido numericamente por métodos como Newton-Raphson ou Gauss-Seidel de maneira iterativa.

#### 4.4 Montagem do caso base.

A análise do fluxo de potência e do comportamento do sistema elétrico no estado exige a combinação de cenários de geração e carga, fundamentais para subsidiar decisões operativas e garantir a segurança energética. Nesse contexto, o ONS fornece casos de referência que modelam condições de geração e patamares de carga, adaptados às particularidades regionais, como as variações sazonais e a crescente participação de fontes renováveis.

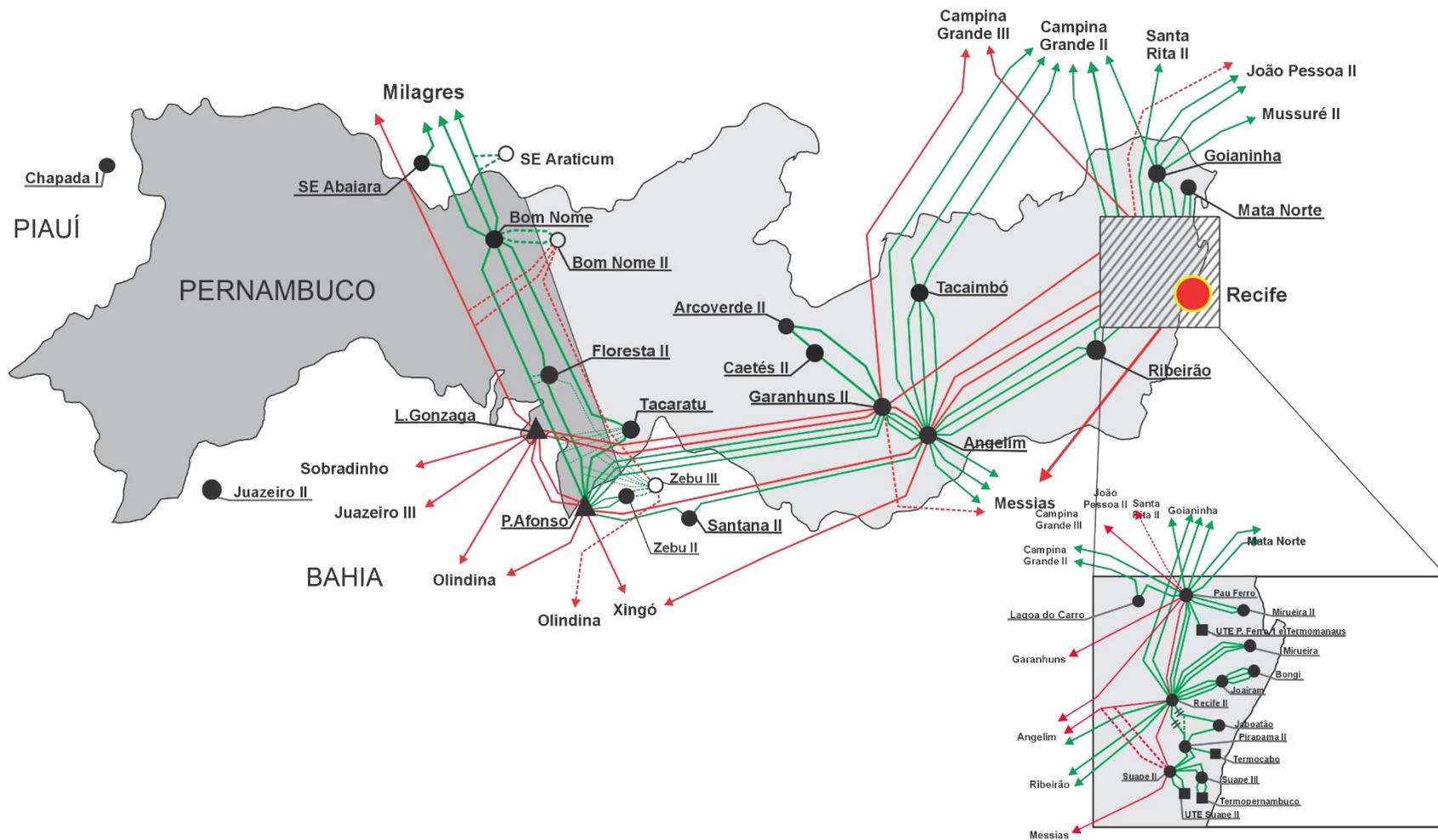
Para simular a parte do SIN que diz respeito a Pernambuco, faz-se necessário utilizar os casos do PARPEL [42], proporcionando a configuração, carga e geração do SIN no horizonte de cinco anos.

Os dados de carga são enviados ao ONS diretamente pelos agentes de distribuição. O despacho da geração é realizado com base nos dados históricos, levando em consideração cada fonte e sua localidade, além de alterar o fator de capacidade dependendo da época do ano e da unidade federativa em que está instalada. Uma das prerrogativas utilizadas pelo ONS na montagem dos casos, é representar apenas centrais geradoras com Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) firmado, o que pode levar a condições operacionais mais restritivas [42].

Para este estudo, que visa analisar se uma infraestrutura de carregamento de veículos exigirá um reforço adicional no SIN, é pertinente realizar algumas alterações no que diz respeito à análise dessa inserção de novas cargas na pior condição para o atendimento às demandas, um caso sem MMDG e com o maior valor de carga registrado no barramento, independente do horário.

Como esses carregadores se conectariam diretamente à rede de distribuição estadual, todo o fluxo gerado por essas cargas passaria pelas chamadas subestações de fronteira, que interligam os sistemas de transmissão e distribuição. O estado de Pernambuco conta com 17 subestações de fronteira, das quais se ramificam diversos circuitos de distribuição. Além disso, existem outras três subestações (SEs) fora do estado que atendem a carga da Neoenergia PE: SE Chapada I, localizada no Piauí; SE Juazeiro da Bahia II; e SE Zebu II, em Alagoas. Assim, o total de subestações de fronteira chega a 20, conforme ilustrado na Figura 11. É importante destacar que, em cada subestação de fronteira, estão conectadas diversas subestações do sistema de distribuição, sistema no qual serão integradas as cargas dos carregadores de veículos elétricos. Assim, mesmo que determinada região não possua muitas subestações de fronteira, ainda pode contar com várias subestações de distribuição. A carga associada a cada barramento de fronteira corresponde ao somatório das demandas das subestações de distribuição a ele conectadas.

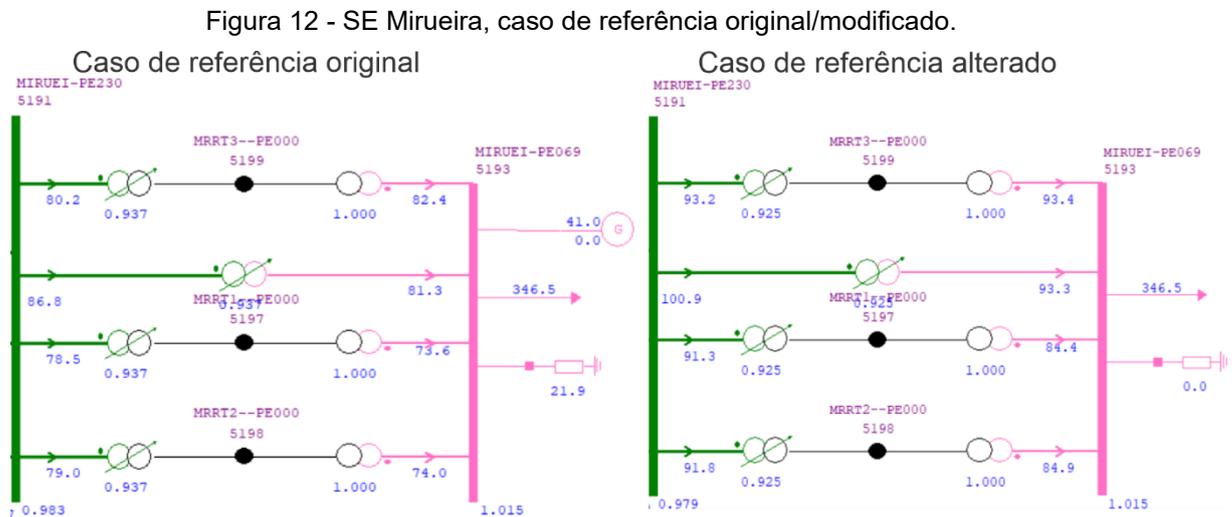
Figura 11 - Diagrama elétrico do estado de Pernambuco



Fonte: Autoria própria.

Para estressar ainda mais o caso em estudo, é pertinente utilizar a carga Máxima não coincidente, adotada pelo ONS para a análise da transformação de fronteira e a apresentação dos resultados durante as reuniões regulares do ciclo do PARPEL. A particularidade desse tipo de carga é que ela representa o maior valor de demanda da respectiva subestação, independentemente do horário. Dessa forma, não faz sentido utilizar um patamar de carga baseado nos casos de referência. No entanto, o cenário adotado considera o Nordeste como exportador de energia [42].

Além disso, para aumentar o carregamento nos transformadores, é conveniente retirar toda a geração presente na barra, bem como os shunts capacitivos. A Figura 12 apresenta os valores de carregamento originais do caso de referência de 2028, no patamar de máxima diurna, e os novos valores de capacidade de transformação após a aplicação das medidas mencionadas, onde é possível observar um crescimento médio de 11% no carregamento dessa subestação.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 Divisão das cargas.

Devido à sua grande extensão, o estado de Pernambuco não possui subestações de fronteira que abranjam todo o seu território. De acordo com a Figura 11, a última subestação de fronteira do estado é a SE Bom Nome, o que sugere a falta

de uma rede de transmissão robusta para o restante do estado. No entanto, como mencionado anteriormente, três subestações localizadas fora da unidade federativa abastecem cargas dessa região: Chapada I, Juazeiro II e Zebu II.

Como o critério utilizado para quantificar os postos de recarga foi a extensão das rodovias, o montante de aproximadamente 66 MW seria distribuído igualmente entre as subestações de fronteira do estado. Porém, diante da escassez de subestações de RB no lado esquerdo de Pernambuco, delimitada pela parte escura do mapa na Figura 11, o estudo adotou como premissa a divisão do estado em duas grandes regiões: o lado esquerdo, atendido pelas SEs Chapada I, Juazeiro II, Bom Nome e Zebu II, e o lado direito, atendido por 16 subestações. Dessa forma, cada região receberia metade da carga dos carregadores, resultando nos valores presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Divisão das Cargas entre as subestações de fronteira.

Região 1	MW	Mvar
Chapada I	8,27	1,68
Zebu II	8,27	1,68
Juazeiro II	8,27	1,68
Bom Nome	8,27	1,68
Região 2	MW	Mvar
Mirueira	2,07	0,42
Mirueira II	2,07	0,42
Pau Ferro	2,07	0,42
Lagoa do Carro II	2,07	0,42
Bongi	2,07	0,42
Jaboatão II	2,07	0,42
Joairam	2,07	0,42
Angelim	2,07	0,42
Arcoverde II	2,07	0,42
Garanhuns II	2,07	0,42
Tacaimbó	2,07	0,42
Suape III	2,07	0,42
Mata Norte	2,07	0,42
Goianinha	2,07	0,42
Ribeirão	2,07	0,42
Pirapama	2,07	0,42

Fonte: Autoria própria.

## 5 SIMULAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Para realizar a simulação de fluxo de potência foi utilizado o software de Análise de Redes Elétricas (ANAREDE), de propriedade do CEPEL. Essa ferramenta é altamente adotada para a realização de estudos elétricos, e recomendada no submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS [54], que correspondem às normas estabelecidas pelo ONS, e outorgadas pela ANEEL, para orientar e regular as ações de coordenação e gestão operacional da geração e transmissão de energia elétrica no âmbito do SIN. A vantagem da sua utilização, é possibilitar a visualização de dados como carregamento nos transformadores e linhas de transmissão, tensões e ângulos, auxiliando na análise.

Para a configuração inicial do caso base utilizado na simulação, foram adotados os casos de referência disponibilizados pelo PARPEL em 2024. O cenário considerado representa o Nordeste como uma região exportadora, sob condições de carga máxima não coincidente para as subestações do estado de Pernambuco, utilizando a configuração prevista para 2028/2029.

A escolha desse período se deve ao fato de que 2028 é um ano crítico para a carga e a configuração do sistema elétrico do estado. Isso ocorre porque, em 2029, está prevista a entrada em operação de diversas obras licitadas no Leilão de Transmissão ANEEL nº 002/2024, que incluem melhorias e expansões na infraestrutura elétrica de Pernambuco. Dentre essas melhorias, destaca-se a nova subestação SE 500/230 kV Bom Nome II, além da implementação de novas linhas de transmissão e seccionamentos, que fortalecerão a rede elétrica estadual.

A ANEEL estabelece diretrizes para a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, e o ONS segue o critério N-1 para a operação do SIN [55]. Esse critério assegura que a perda de qualquer elemento do sistema (como linhas de transmissão, transformadores ou geradores) não deve comprometer o atendimento à demanda, nem causar sobrecargas inadmissíveis nos equipamentos remanescentes.

Assim, se uma subestação de fronteira perder um de seus transformadores, o sistema deve ser capaz de continuar a atender essa demanda sem que isso gere sobrecargas inadmissíveis nos equipamentos restantes, garantindo a continuidade do suprimento de energia de forma segura e dentro dos limites operacionais

estabelecidos. Com base nessa premissa, o presente estudo comparou o sistema elétrico do estado de Pernambuco em condição normal de operação (N) e sob o critério N-1, considerando os transformadores de cada subestação de fronteira do estado. Inicialmente, a pesquisa teve como objetivo analisar se as cargas adicionais dos carregadores de veículos elétricos nas rodovias poderiam gerar sobrecarga nos transformadores das subestações de fronteira, mesmo em condição normal de operação.

Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 6, que destaca a maior porcentagem de carregamento em relação à capacidade nominal de cada subestação, antes e após a inserção das cargas provenientes dos postos de recarga elétricos, permitindo avaliar o impacto da inserção das novas cargas sobre a infraestrutura existente.

Tabela 6 - Comparativo entre carregamento das subestações de fronteira.

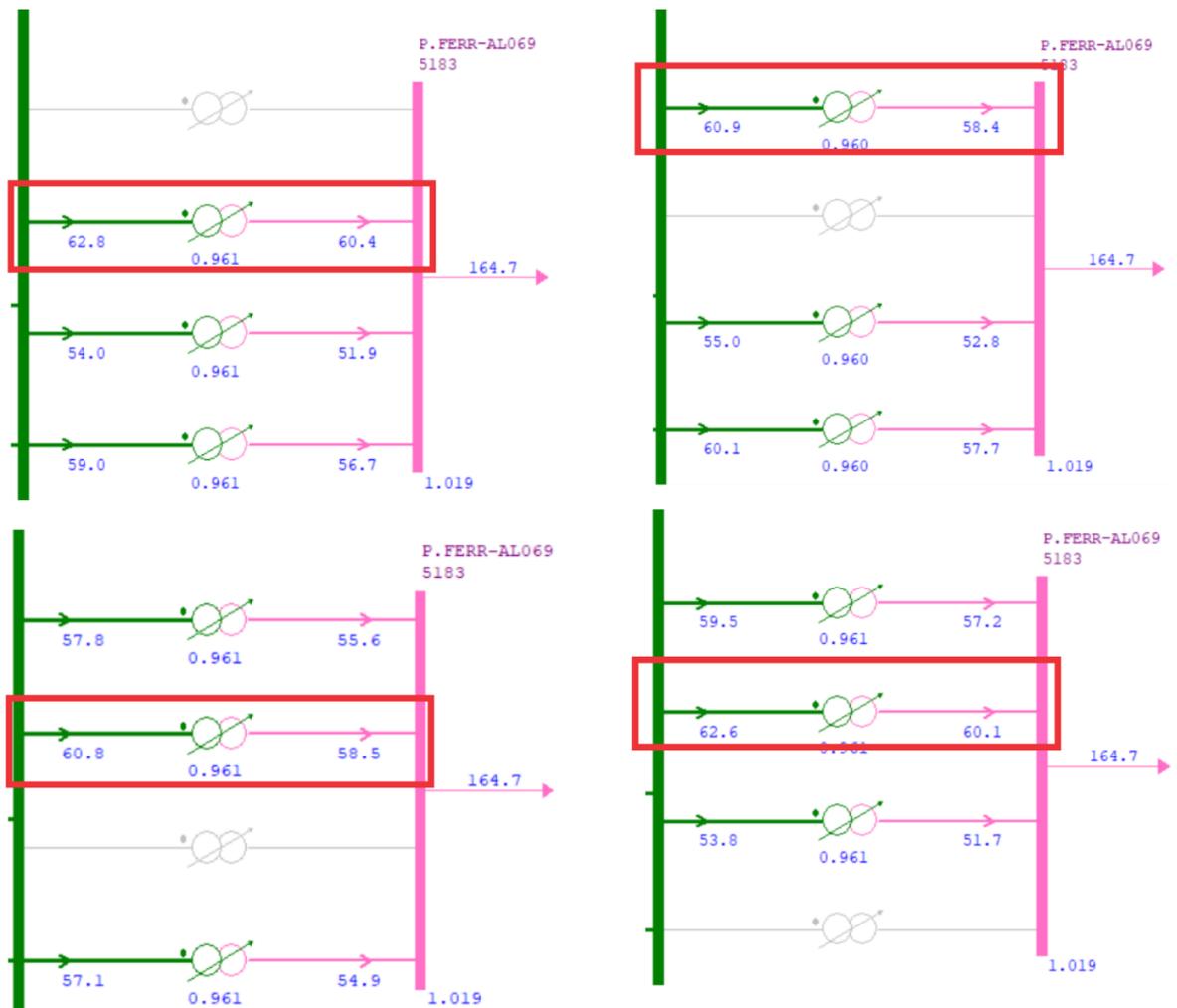
Subestação de Fronteira	Percentual de carregamento (Sem carregadores)	Percentual de carregamento (Com carregadores)
Chapada I	11,8	13,4
Zebu II	34,6	35,9
Juazeiro II	82,4	84,6
Bom Nome	34,4	38,0
Mirueira	96,4	97,0
Mirueira II	54,0	54,7
Pau Ferro	46,6	47,2
Lagoa do Carro II	40,0	40,8
Bongi	53,6	53,9
Jaboatão II	63,5	64,3
Joairam	48,6	49,0
Angelim	33,5	34,2
Arcoverde II	32,4	33,5
Garanhuns II	33,8	34,8
Tacaimbó	88,2	88,8
Suape III	56,3	57,0
Mata Norte	7,6	8,3
Goianinha	49,2	49,8
Ribeirão	68,6	69,2
Pirapama	49,8	50,4

Fonte: Autoria própria.

Com base nessa análise, é possível concluir que não há uma sobrecarga em N devido a conexão dessas cargas, resta agora avaliar se essa demanda adicional causa sobrecarga em N-1. Para isso, é necessário um novo comparativo entre o caso base do estudo, antes e após a inserção dessas cargas.

Para a análise em N-1 de maneira convencional, no ANAREDE, o usuário realizaria contingência simples em cada elemento de transformação da subestação e observaria em qual caso gerou o maior percentual de carga, como demonstrado na Figura 13. Para a subestação de Pau Ferro, é possível observar que quando realizada a contingência no primeiro transformador, obtém-se o maior valor de carregamento da subestação.

Figura 13 - Comparativo entre os valores de carregamentos em N-1.



Fonte: Autoria própria.

No entanto, realizar esse processo para cada barra do estado seria custoso em tempo, e quaisquer alterações no caso base resultaria em sua repetição. Para realizar esse tipo de análise se torna mais prática a utilização de outro *software*, o Organon, de propriedade da HPPA Consultoria em parceria com o ONS [54]. Tanto o ANAREDE quanto o Organon possuem métodos para realizar de maneira automática todas as contingências mapeadas previamente pelo usuário, tornando a análise mais prática. A Vantagem da ferramenta da HPPA está no seu arquivo de saída, que é um arquivo .CSV, possibilitando o tratamento dos dados no Microsoft Excel.

Como *input* do programa, antes é preciso criar um arquivo contendo todas as contingências que o usuário deseja analisar. Essas instruções possuem um formato específico, como descrito na Figura 14.

Figura 14 - Formatação de arquivo de contingências para o Organon.

```

!----PE----
!----Pau Ferro----
'P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 1'
BRANCH 5181 5183 1
END /
!----PE----
!----Pau Ferro----
'P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 2'
BRANCH 5181 5183 2
END /
!----PE----
!----Pau Ferro----
'P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 3'
BRANCH 5181 5183 3
END /
!----PE----
!----Pau Ferro----
'P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 4'
BRANCH 5181 5183 4
END /

```

Comentário - Nome da área,  
e da SE

Nome da Contingência

Circuito do transformador, com as barras  
DE e PARA do ANAREDE

Fonte: Autoria própria.

Após o mapeamento de todas as contingências, é fundamental informar ao Organon quais valores de carregamento devem ser monitorados. Esse monitoramento fornecerá ao usuário os seguintes indicadores:

- L1% Pré: Percentual de carregamento antes da contingência, em relação à capacidade normal do transformador;
- L1 Pós: Percentual de carregamento após a contingência, considerando a capacidade normal do transformador;
- L2 Pós: Percentual de carregamento após a contingência, em relação à capacidade de emergência dos transformadores.

No arquivo de monitoração deve conter apenas o circuito a ser monitorado, para o Organon, as linhas que começam com “!” são definidas como comentários, sendo de fato importantes apenas para facilitar a navegação do usuário. O exemplo de preenchimento do arquivo de monitoração está presente na Figura 15.

Figura 15 - Arquivo de monitoração do Organon.

```

!---PE---
!---Pau Ferro---
!P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 1'
BRANCH 5181 5183 1 MONIT=T
!---PE---
!---Pau Ferro---
!P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 2'
BRANCH 5181 5183 2 MONIT=T
!---PE---
!---Pau Ferro---
!P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 3'
BRANCH 5181 5183 3 MONIT=T
!---PE---
!---Pau Ferro---
!P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 4'
BRANCH 5181 5183 4 MONIT=T

```

Comentário - Nome da área, da SE e do equipamento a ser monitorado

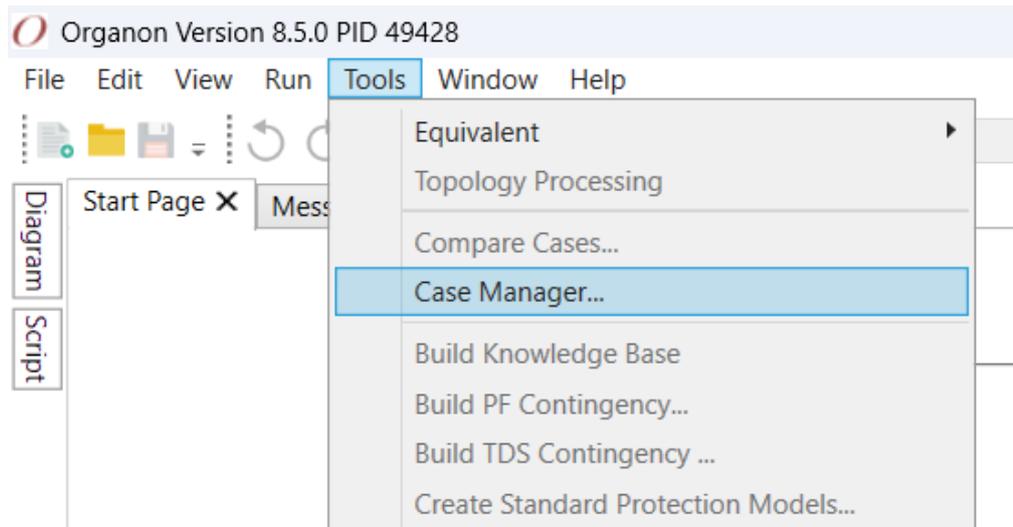
Circuito a ser monitorado

Fonte: Autoria própria.

Por fim, basta fornecer ao programa o caso base no formato de ponto de operação, arquivo do ANAREDE que mantém o valor dos ângulos e tensões da barra,

e colocar todos os arquivos em uma mesma pasta do computador. Com o *software* aberto, basta seguir o passo descrito na Figura 16 para abrir o gerenciador de casos do Organon.

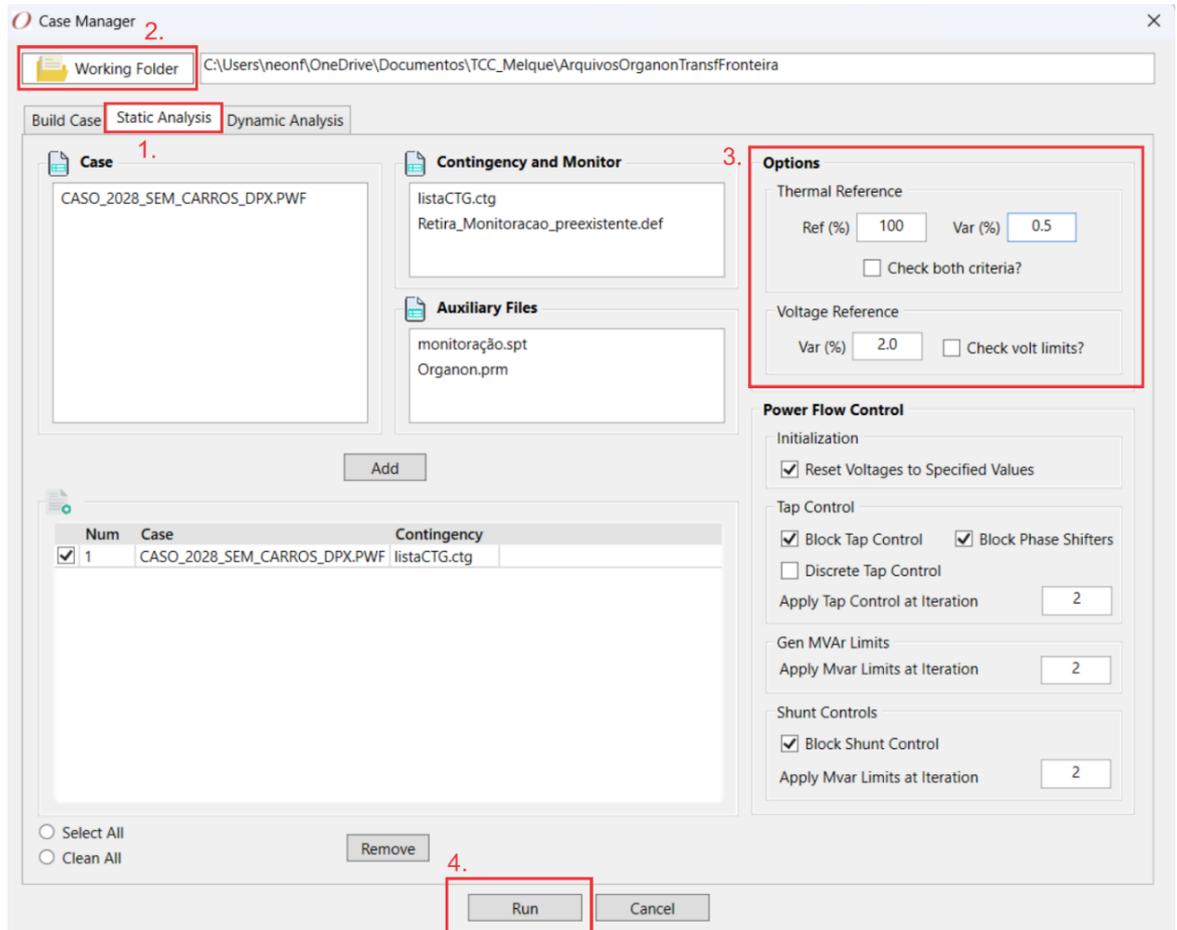
Figura 16 - Gerenciador de casos do Organon.



Fonte: Autoria própria.

Após a abertura da janela, deve-se clicar em *Static Analysis*. Em seguida, é necessário selecionar a pasta de trabalho correspondente. Para que a análise foque exclusivamente no carregamento dos transformadores, recomenda-se desmarcar a opção de referência de tensão. Além disso, no campo *Var(%)*, localizado ao lado de *Thermal Voltage*, deve-se definir uma variação mínima de 0,5%. Dessa forma, no *Output* do Organon, serão exibidos apenas os equipamentos cuja variação de carregamento ultrapasse esse limite após a contingência, permitindo uma identificação mais precisa dos impactos no sistema, por fim basta clicar em *Run*, como exemplificado na Figura 17.

Figura 17 - Janela Case Manager do Organon.



Fonte: Autoria própria.

O programa gera, na pasta em que estão os arquivos de contingência e monitoração, um arquivo .CSV, que contém as informações de qual equipamento foi realizada a contingência, em seguida, informa em qual transformador foi observado o carregamento e fornece os valores de carregamento, como descrito na Figura 18.

Figura 18 - Arquivo de saída Organon.

CASO_2028_SEM_CARROS.PWF										
1. Contingência		2. Circuito analisado				3. Valores de Carregamento				
CTG ID	From B	From Name	To Bus - I	To Name	L1 Pre	L1 Pos	Var (%)	L2 Pos	L3 Pos	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 2	5181	P,FERR-PE230	5183 #01	P,FERR-AL069	46,63	60,91	14,27	60,91	60,91	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 3	5181	P,FERR-PE230	5183 #01	P,FERR-AL069	46,63	62,65	16,01	62,65	62,65	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 4	5181	P,FERR-PE230	5183 #01	P,FERR-AL069	46,63	62,92	16,29	62,92	62,92	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 1	5181	P,FERR-PE230	5183 #04	P,FERR-AL069	44,34	60,96	16,62	60,96	67,74	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 2	5181	P,FERR-PE230	5183 #04	P,FERR-AL069	44,34	57,92	13,57	57,92	64,35	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 3	5181	P,FERR-PE230	5183 #04	P,FERR-AL069	44,34	59,57	15,23	59,57	66,19	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 1	5181	P,FERR-PE230	5183 #03	P,FERR-AL069	43,78	60,19	16,41	60,19	752,32	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 2	5181	P,FERR-PE230	5183 #03	P,FERR-AL069	43,78	57,18	13,4	57,18	714,7	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 4	5181	P,FERR-PE230	5183 #03	P,FERR-AL069	43,78	59,07	15,29	59,07	738,34	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 1	5181	P,FERR-PE230	5183 #02	P,FERR-AL069	40,09	55,12	15,03	55,12	137,8	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 3	5181	P,FERR-PE230	5183 #02	P,FERR-AL069	40,09	53,86	13,77	53,86	134,65	
P.FERR-PE230 - P.FERR-PE069 - 4	5181	P,FERR-PE230	5183 #02	P,FERR-AL069	40,09	54,09	14	54,09	135,24	

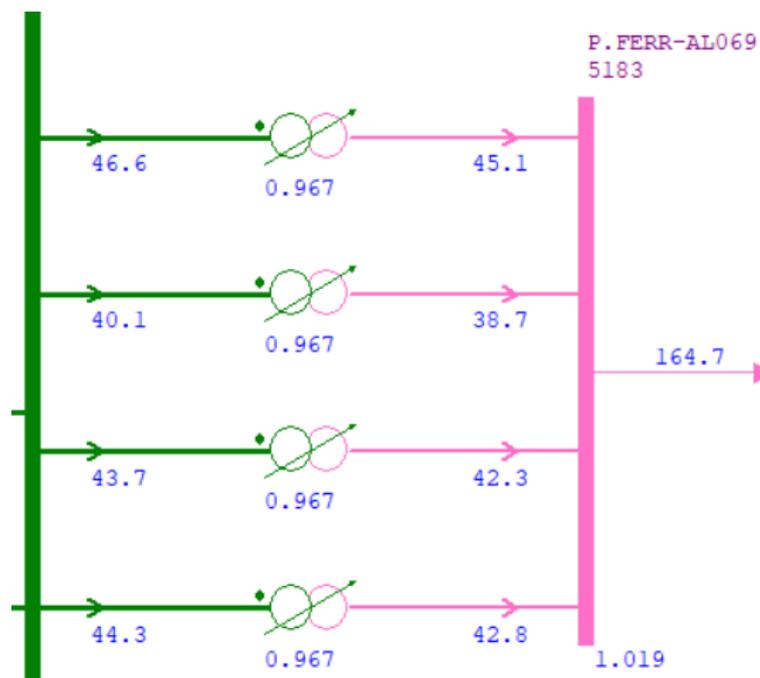
Fonte: Autoria própria.

Essa análise permite avaliar se o carregamento supera a capacidade de emergência do respectivo, exigindo medidas conjunturais (como remanejamento de cargas), ou o reforço a ser instalado naquela subestação.

Para aumentar a eficiência do estudo, optou-se por simular as contingências considerando dois cenários: sem a demanda adicional e com o caso base. Dessa forma, é possível identificar se as sobrecargas observadas são realmente causadas pela inserção das novas cargas ou se ocorrem independentemente da conexão.

Ao realizar a simulação, foram obtidos os valores de carregamento de cada equipamento das respectivas subestações. Embora uma subestação possua 4 transformadores, o arquivo de saída contém 12 resultados de carregamento. Isso ocorre porque o Organon aplica a contingência em um transformador e observa o carregamento nos equipamentos remanescentes, repetindo esse processo para todos os equipamentos da mesma subestação. Tomando a SE Pau Ferro, ilustrada na Figura 19, que possui 4 Transformadores (TRs) 230/69 kV – 100 MVA, como ponto de análise, foram obtidos os dados de carregamento dos equipamentos remanescentes após a contingência, os quais estão apresentados na Tabela 7.

Figura 19 - SE Pau Ferro.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 - Carregamento dos transformadores da SE Pau Ferro.

Carregamento dos transformadores da SE Pau Ferro				
	CTG TR 1	CTG TR 2	CTG TR 3	CTG TR 4
Carregamento TR1 (%)	-	60,9	62,7	62,9
Carregamento TR2 (%)	55,1	-	53,9	54,1
Carregamento TR3 (%)	60,2	57,2	-	59,1
Carregamento TR4 (%)	61,0	57,9	59,6	-

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que um mesmo transformador pode apresentar valores diferentes de carregamento, dependendo de qual outro equipamento sofreu a contingência. Isso poderia ser influenciado pela diferença nas capacidades dos transformadores, mas esse não é o caso da SE Pau Ferro. O próximo passo consistiu em analisar os parâmetros de cada transformador, com foco em sua reatância (X) e resistência (R).

Constatou-se que os valores de X e R, valores presentes nos casos do PAR/PEL, são diferentes para os transformadores como destacado na Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

Figura 20 - Parâmetros do TR 1 da SE Pau Ferro.

The screenshot displays the 'Dados de Circuito CA (DLIN)' window. The 'Circuito' section shows 'Barra De: 5181' and 'Barra Para: 5183'. The 'Barra Proprietária' section has 'De' selected. The 'Capacidade' section shows 'Normal: 100 MVA/unid', 'Emergência: 100 MVA/unid', and 'Equipamento: 100 MVA/unid'. The 'Resistência' field is highlighted with a red box and contains the value 12.44. The 'Reatância' field contains 12.44. The 'Tap' section shows 'Especificado: .9671', 'Mínimo: .727', 'Máximo: 1.117', and 'Steps: 21'. The 'Tensão Barra' is 1019 p.u. and 'Tensão Especificada' is 1018. The 'Shunt Equivalente' and 'Shunt Individualizado (DBSH)' sections show injection values for 'De' and 'Para'.

Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - Parâmetros do TR 2 da SE Pau Ferro.

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 5181 Nome: P.FERR-PE230  Ligado

Barra Para: 5183 Nome: P.FERR-AL069  Ligado

Número: 2  Circuitos existentes

Barra Proprietária

De

Para

Barra Controlada

5183

Direção De

Direção Para

Ligado

Capacidade

Normal: 100 MVA/unid

Emergência: 100 MVA/unid

Equipamento: 40 MVA/unid

Resistência:  %/unid

Reatância: 14.47 %/unid

Susceptância:  Mvar

Unid Max: 1

Unid Operação: 1

Tap

Especificado: .9671

Mínimo: .727

Máximo: 1.117

Defasamento:  graus

Steps: 21

Manobrável: Sim

Controle Congelado

Agregadores

Tensão Barra

1019 p.u.

Tensão Especificada

1018

Shunt Equivalente

Injeção De:  Mvar

Injeção Para:  Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De:  Mvar

Injeção Para:  Mvar

Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - Parâmetros do TR 3 da SE Pau Ferro.

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 5181 Nome: P.FERR-PE230  Ligado

Barra Para: 5183 Nome: P.FERR-AL069  Ligado

Número: 3  Circuitos existentes

Barra Proprietária

De

Para

Barra Controlada

5183

Direção De

Direção Para

Ligado

Capacidade

Normal: 100 MVA/unid

Emergência: 100 MVA/unid

Equipamento: 8 MVA/unid

Resistência: .218 %/unid

Reatância: 13.25 %/unid

Susceptância:  Mvar

Unid Max: 1

Unid Operação: 1

Tap

Especificado: .9671

Mínimo: .727

Máximo: 1.117

Defasamento:  graus

Steps: 21

Manobrável: Sim

Controle Congelado

Agregadores

Tensão Barra

1019 p.u.

Tensão Especificada

1018

Shunt Equivalente

Injeção De:  Mvar

Injeção Para:  Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De:  Mvar

Injeção Para:  Mvar

Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - Parâmetros do TR 4 da SE Pau Ferro.

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 5181 Nome: P.FERR-PE230  Ligado

Barra Para: 5183 Nome: P.FERR-AL069  Ligado

Número: 4  Circuitos existentes

Barra Proprietária

De

Para

Barra Controlada

5183

Direção De

Direção Para

Ligado

Capacidade

Normal: 100 MVA/unid

Emergência: 100 MVA/unid

Equipamento: 90 MVA/unid

Resistência: .26 %/unid

Reatância: 13.08 %/unid

Susceptância: Mvar

Unid Max: 1

Unid Operação: 1

Tap

Especificado: .9671

Mínimo: .727

Máximo: 1.117

Defasamento: graus

Steps: 21

Manobrável: Sim

Controle Congelado

Agregadores

Tensão Barra

1019 p.u.

Tensão Especificada

1018

Shunt Equivalente

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

Fonte: Autoria própria.

Os valores de resistência e reatância explicam a diferença no carregamento dos transformadores. A reatância causa uma oposição ao fluxo de corrente alternada, o que significa que, quanto menor a reatância, menor será a impedância total do transformador. Isso permite que mais corrente flua através dele, como ocorre com o TR1, que sempre apresenta valores mais altos de carregamento [56]. O maior valor de carregamento no TR1 é observado após uma contingência no TR4. Isso acontece porque o TR4 possui um valor de resistência maior, o que resulta em perdas de energia. Assim, o fluxo que antes passaria pelo TR4 e seria parcialmente perdido se distribui entre os outros transformadores, especialmente o TR1, que acaba absorvendo uma parte maior da carga.

O objetivo do estudo é analisar o pior cenário, para o qual foi escolhido o maior valor de carregamento obtido após a contingência simples para cada subestação. No primeiro cenário, em que não são consideradas as cargas adicionais provenientes dos postos de recarga de EVs, os dados de carregamento podem ser observados na Tabela 8. Já no segundo cenário, onde essas cargas adicionais estão presentes, os dados estão na Tabela 9.

Observa-se que, em alguns casos, L1 ultrapassa 100%, indicando que os transformadores excederam sua capacidade nominal. No entanto, L2 permanece abaixo de 100%, o que significa que o equipamento ainda está operando abaixo de sua capacidade de curta duração. Os valores iguais de L1 e L2 indicam que o transformador não possui capacidade de emergência. De acordo com os relatórios de [42], a sobrecarga, embora indesejável, não resulta imediatamente em perda do equipamento. Tomando a SE Mirueira II como exemplo, é possível observar, por meio da Figura 24 e Figura 25, que, ao considerar o carregamento em relação à capacidade nominal dos equipamentos, há uma sobrecarga visível nos transformadores. No entanto, quando o filtro de carregamento é aplicado em relação à capacidade de emergência, não há sobrecarga visível.

Tabela 8 - Dados de carregamentos para cenário sem postos de recarga de EVs.

Subestação de Fronteira	L1 (%) (Caso Base, sem carga adicional)	L2 (%) (Caso Base, sem carga adicional)
Chapada I	24,3	24,3
Zebu II	44,6	44,5
Juazeiro II	111,5	111,5
Bom Nome	67,7	67,7
Mirueira	133,0	125,5
Mirueira II	110,4	92,0
Pau Ferro	62,9	62,9
Lagoa do Carro II	80,9	67,4
Bongi	69,2	65,2
Jaboatão II	130,0	108,3
Joairam	73,3	73,3
Angelim	50,4	48,5
Arcoverde II	65,6	54,7
Garanhuns II	68,7	57,3
Tacaimbó	118,8	117,6
Suape III	85,4	71,3
Mata Norte	15,1	12,6
Goianinha	65,9	65,8
Ribeirão	92,6	92,6
Pirapama	67,2	65,1

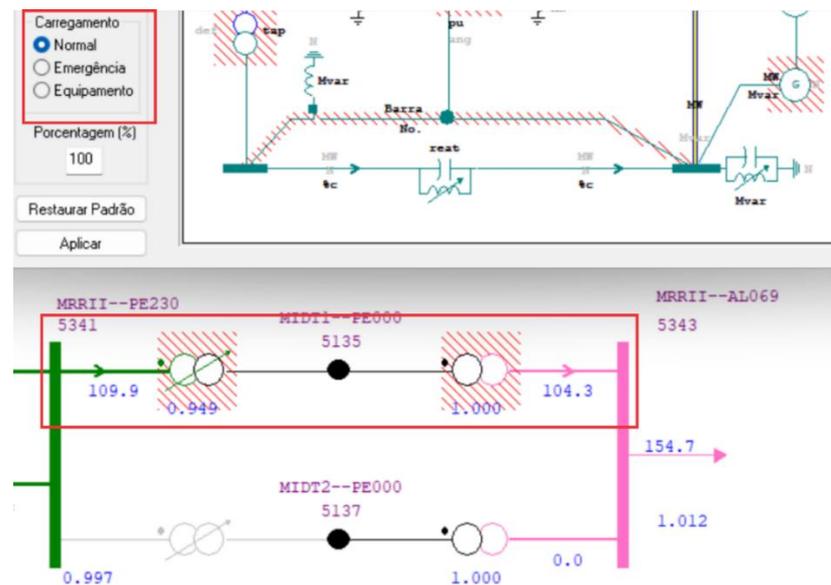
Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Dados de carregamentos para cenário com postos de recarga de EVs

Subestação de Fronteira	L1 (%) (Caso Base, com carga adicional)	L2 (%) (Caso com carga adicional)
Chapada I	27,7	27,7
Zebu II	45,8	45,8
Juazeiro II	114,6	114,6
Bom Nome	76,4	76,4
Mirueira	133,9	126,3
Mirueira II	111,9	93,3
Pau Ferro	63,7	63,7
Lagoa do Carro II	82,4	68,7
Bongi	69,5	65,6
Jaboatão II	131,5	109,6
Joairam	74,1	74,1
Angelim	51,4	49,6
Arcoverde II	67,8	56,5
Garanhuns II	70,9	59,1
Tacaimbó	120,7	118,5
Suape III	86,6	72,2
Mata Norte	16,5	13,7
Goianinha	66,6	66,6
Ribeirão	93,4	93,4
Pirapama	67,9	65,8

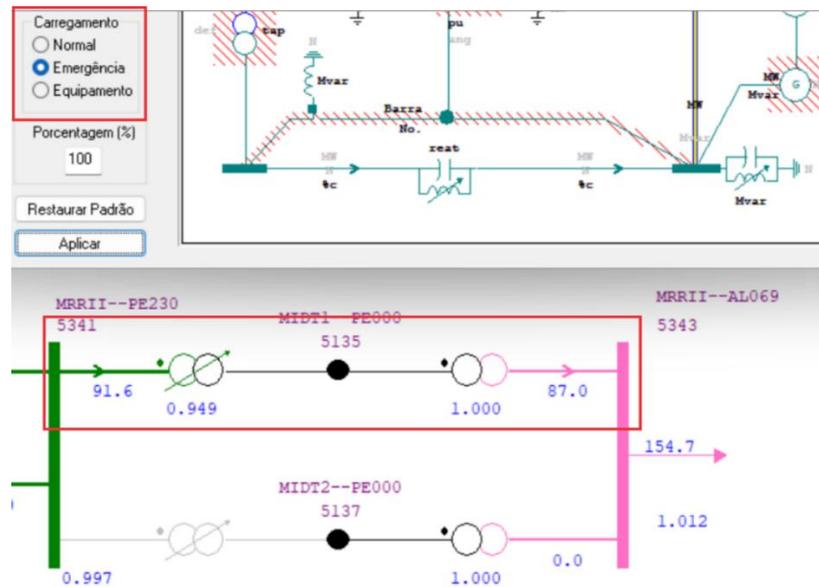
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Carregamento da SE Mirueira em relação à capacidade nominal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Carregamento da SE Mirueira em relação à capacidade de emergência.



Fonte: Autoria própria.

Como parâmetro de comparação, foi adotado o L2 (pós), considerando que o transformador pode operar dentro da faixa entre sua capacidade nominal e de emergência. Dessa forma, caso o valor de L2 ultrapasse 100%, a sobrecarga nos equipamentos remanescentes da subestação será considerada inadmissível, indicando a necessidade de medidas corretivas.

A análise do arquivo de saída do Organon permitiu comparar os valores de carregamento dos transformadores remanescentes após uma contingência em um dos equipamentos para ambos os cenários. Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 10.

As subestações, destacadas em vermelho na Tabela 10, apresentam sobrecargas inadmissíveis nos equipamentos remanescentes. Além disso, a variação percentual entre os casos evidencia que a maior diferença ocorreu justamente nas subestações da Região 1, composta pelas SEs Chapada I, Zebu II, Juazeiro II e Bom Nome, que registraram uma variação média de 4,15% no carregamento após a inserção das cargas.

Por outro lado, nas subestações da Região 2, a variação média foi de apenas 0,9%, o que pode ser atribuído ao elevado número de subestações nessa área, especialmente na região metropolitana do Recife.

Tabela 10 - Comparação entre os casos com/sem carregadores de EVs.

Subestação de Fronteira	L2 (%) (Caso Base, sem carga adicional)	L2 (%) (Caso com carga adicional)	Variação (%)
Chapada I	24,3	27,7	3,4
Zebu II	44,5	45,8	1,4
Juazeiro II	111,2	114,2	3,1
Bom Nome	67,7	76,4	8,7
Mirueira	125,5	126,3	0,8
Mirueira II	92,0	93,3	1,3
Pau Ferro	62,9	63,7	0,8
Lagoa do Carro II	67,4	68,7	1,3
Bongi	65,2	65,6	0,3
Jaboatão II	108,3	109,6	1,3
Joairam	73,3	74,1	0,7
Angelim	48,5	49,6	1,0
Arcoverde II	54,7	56,5	1,8
Garanhuns II	57,3	59,1	1,8
Tacaimbó	117,6	118,5	0,8
Suape III	71,3	72,2	1,0
Mata Norte	12,6	13,7	1,2
Goianinha	65,8	66,6	0,8
Ribeirão	92,6	93,4	0,8
Pirapama	65,1	65,8	0,7

Fonte: Autoria própria.

O ONS verifica junto se o Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) contratado para o ano está de acordo com os valores enviados pelo próprio agente de distribuição nos estudos do PARPEL. Caso essa informação seja confirmada, deve-se avaliar a viabilidade de um remanejamento definitivo de cargas para outras subestações por meio da rede de distribuição ou a implementação de um Sistema Especial de Proteção (SEP) para corte de carga [42].

Se nenhuma dessas ações for suficiente para solucionar a sobrecarga, será necessário indicar reforços ou melhorias na subestação, como a instalação de um novo transformador ou a substituição de equipamentos antigos por modelos mais modernos e eficientes [42].

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que os problemas de sobrecarga em regime N-1 ocorreriam independentemente da inserção da carga

proveniente dos postos de recarga de veículos elétricos nas rodovias de Pernambuco. No entanto, ressalta-se que a adição dessas novas cargas tende a agravar ainda mais o problema.

Essas sobrecargas, no entanto, podem ser atenuadas ou até mesmo eliminadas dentro do horizonte de estudo, por meio da implementação de soluções conjunturais e/ou estruturais indicadas em [42]. No caso da SE Juazeiro da Bahia II, não foram propostas soluções, uma vez que o valor de MUST contratado é inferior ao considerado nos estudos do PAR/PEL ao se adotar o valor efetivamente contratado, a sobrecarga não ocorre [42].

No caso das demais sobrecargas identificadas, as soluções estruturais e/ou conjunturais recomendadas para mitigar os problemas estão apresentadas nas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 11 - Soluções propostas para a SE Mirueira.

<b>Subestação</b>
<b>Mirueira</b> <b>230/69 kV</b> (4 x 100/106) MVA
<p><b><u>Solução Conjuntural:</u></b>            SEP de corte de carga na SE Mirueira, bem como a redistribuição de carga da SE Mirueira para as SEs Bongí e Mirueira II.</p> <p><b><u>Solução Estrutural:</u></b>            Instalação de 2 TRs 230/69 kV – 200 MVA em substituição aos TRs 230/69 kV – 100 MVA (04T3 e 04T4), que estão em final de vida útil.</p>

Fonte: Adaptado de [42].

Tabela 12 - Soluções propostas para a SE Jaboatão II.

<b>Subestação</b>
<b>Jaboatão II</b> <b>230/69 kV</b> (3 x 150/150) MVA
<p><b><u>Solução Conjuntural:</u></b> Recomendado neste PAR/PEL avaliação da viabilidade da transferência definitiva de partes das cargas da SE Jaboatão II para as SEs Pirapama e Bongí.</p> <p><b><u>Solução Estrutural:</u></b> Nada a registrar.</p>

Fonte: Adaptado de [42].

Tabela 13 - Soluções propostas para a SE Tacaimbó.

<b>Subestação</b>
<b>Tacaimbó</b> <b>230/69 kV</b> (3 x 150/150) MVA
<p><b><u>Solução Conjuntural:</u></b> Recomendado neste PAR/PEL avaliação da viabilidade da transferência definitiva de parte das cargas da SE Tacaimbó para a SE Angelim.</p> <p><b><u>Solução Estrutural:</u></b> Nada a registrar.</p>

Fonte: Adaptado de [42].

É importante destacar que a análise considerou um cenário conservador, no qual todos os postos de recarga operam simultaneamente em sua capacidade máxima instalada. Esse caso representa o pior cenário possível em termos de impacto na transformação de fronteira. No entanto, na prática, esse cenário ainda é pouco provável que aconteça, pois os usuários de veículos elétricos tendem a iniciar suas viagens com os veículos parcialmente ou totalmente carregados, assim como ocorre com motoristas de automóveis movidos a combustão, tendo os postos de recargas como fatores para diminuição da ansiedade de autonomia.

## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O avanço da mobilidade elétrica é um caminho inevitável para a sustentabilidade do setor de transportes, e a adequação da infraestrutura elétrica é um fator-chave para viabilizar essa transformação de forma eficiente e segura. Neste estudo, foi realizada uma análise detalhada sobre a necessidade de expansão da rede de carregamento para veículos elétricos no estado de Pernambuco, considerando o impacto na rede elétrica e os desafios operacionais associados.

Por meio do ANAREDE e ORGANON, foi possível analisar o desempenho dos transformadores, evidenciando que fatores como reatância e resistência influenciam diretamente o nível de carregamento de cada equipamento. Dessa forma, torna-se essencial um estudo criterioso desses parâmetros ao planejar a alocação de novas cargas. Além disso, verificou-se que a distribuição geográfica das subestações pode representar um desafio para a eletrificação de determinadas regiões, tornando indispensável um planejamento estratégico para a instalação de novos pontos de conexão.

Os resultados das simulações indicaram que, embora a inserção de novas cargas provenientes de carregadores de veículos elétricos aumente o carregamento das subestações de fronteira, a rede, na maioria dos casos, permanece dentro dos limites operacionais aceitáveis. Observou-se que algumas subestações já operavam com níveis elevados de carregamento antes da inserção da infraestrutura de recarga para veículos elétricos, indicando que as limitações observadas não decorrem exclusivamente dessa nova demanda, mas estão fortemente relacionadas ao esgotamento da capacidade de transformação de fronteira. Ainda assim, a adição das novas cargas tende a agravar esse cenário. Destaca-se, no entanto, que as sobrecargas identificadas podem ser mitigadas ou eliminadas ao longo do horizonte analisado, mediante a implementação das soluções conjunturais e/ou estruturais previstas no relatório do PAR/PEL, assegurando maior segurança e confiabilidade no suprimento da demanda futura.

## 6.1 Trabalhos Futuros

A análise realizada neste trabalho abre caminho para pesquisas complementares e aprofundamentos em temas relacionados à integração de veículos elétricos à rede elétrica. Sugere-se os seguintes pontos para futuros estudos:

- Investigar o impacto de carregadores de EVs em parâmetros como distorção harmônica, flutuações de tensão e desequilíbrios de fase, especialmente em cenários com alta penetração de carregadores rápidos.
- Desenvolver modelos que considerem padrões reais de uso de carregadores (horários de pico, sazonalidade e comportamento dos usuários), substituindo a premissa conservadora de carga máxima simultânea.
- Avaliar a viabilidade técnica e econômica de baterias estacionárias ou sistemas de armazenamento distribuído para mitigar sobrecargas em subestações críticas, como Mirueira e Juazeiro II.

## REFERÊNCIAS

1. ICCT - THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/comparacao-das-emissoes-de-gee-ao-longo-do-ciclo-de-vida-de-motores-de-combustao-flex-e-eletricos-veiculos-de-passageiros-brasil-oct23/>>. Acesso em: 31 janeiro 2025.
2. S & P GLOBAL MOBILITY. S&P Global Mobility forecasts 89.6M auto sales worldwide in 2025. Disponível em: <<https://press.spglobal.com/2024-12-20-S-P-Global-Mobility-forecasts-89-6M-auto-sales-worldwide-in-2025>>. Acesso em: 31/01/2025.
3. ABVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. ABVE Data. Disponível em: <<https://abve.org.br/abve-data/bi-geral/>>. Acesso em: 31 janeiro 2025
4. B. Bilgin *et al.*, "Making the Case for Electrified Transportation," in **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, vol. 1, no. 1, pp. 4-17, Junho 2015.
5. M. Guarnieri, "When Cars Went Electric, Part 2 [Historical]," in **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 5, no. 2, pp. 46-53, Junho 2011.
6. M. Guarnieri, "Looking back to electric cars," **2012 Third IEEE HISTORY of ELECTRO-technology CONFERENCE (HISTELCON)**, Pavia, Italy, 2012, pp. 1-6
7. IBERDROLA. História do carro elétrico. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/historia-carro-eletrico>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
8. FLOCKEN Elektrowagen. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. Disponível em: <[https://de.wikipedia.org/wiki/Flocken\\_Elektrowagen](https://de.wikipedia.org/wiki/Flocken_Elektrowagen)>. Acesso em: 13 mar. 2025.
9. HONG, Xin. Current Situation in The Development of Electric Vehicles. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, [S. l.], v. 52, p. 258–266, 2023. DOI: [10.54097/hset.v52i.8904](https://doi.org/10.54097/hset.v52i.8904). Disponível em: <<https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/8904>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
10. Molavi, Ali & Taghipourtalesh, Drmohammad. (2023)., "A survey on electrical cars advantages". **Progress in Energy & Fuels**. 2023.
11. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Electric Vehicles. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
12. IPEA. Os desafios para consolidação dos veículos elétricos no Brasil. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/360-os-desafios-para-consolidacao-dos-veiculos-eletricos-no-brasil>. Acesso em: 13 mar. 2025.
13. YOUSUF, A. K. M.; WANG, Z.; PARANJAPPE, R.; TANG, Y. An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: a comprehensive review of challenges, mitigation approaches, and optimization strategies. **IEEE Access**, v. 12, p. 51570-51589, 2024.

14. ALANAZI, F. Electric vehicles: benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation. *Applied Sciences*, v. 13, 6016, 2023.
15. SINGH, P. P.; WEN, F.; PALU, I.; SACHAN, S.; DEB, S. Electric vehicles charging infrastructure demand and deployment: challenges and solutions. *Energies*, v. 16, n. 7, 2023.
16. DIMITRIADOU, K.; RIGOGIANNIS, N.; FOUNTOUKIDIS, S.; KOTARELA, F.; KYRITSIS, A.; PAPANIKOLAOU, N. Current trends in electric vehicle charging infrastructure: opportunities and challenges in wireless charging integration. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 2057, 2023.
17. DAS, H. S.; RAHMAN, M. M.; LI, S.; TAN, C. W. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: a technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, 2020.
18. ABVE. Veículos eletrificados: conheça as tecnologias disponíveis. ABVE, 2023. Disponível em: <https://abve.org.br/coluna/veiculos-eletrificados-conheca-as-tecnologias-disponiveis/>. Acesso em: 13 mar. 2025.
19. ABVE. Frotas. ABVE. Disponível em: <https://abve.org.br/bi-frotas/>. Acesso em: 13 mar. 2025.
20. WU, Guang; ZHANG, Xing; DONG, Zuomin. Powertrain architectures of electrified vehicles: review, classification and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, v. 352, n. 2, p. 619-635, 2015.
21. YELLOTMOB. BEV, PHEV, HEV, MHEV: Qual é a diferença entre os tipos de veículos elétricos? 2024. Disponível em: <https://yellotmob.com.br/mobilidade-eletrica/bev-phev-hev-mhev-qual-e-a-diferenca-entre-os-tipos-de-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 13 mar. 2025.
22. IBERDROLA. Diferenças entre carros híbridos plug-in e carros elétricos. *Iberdrola*, 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/mobilidade-sustentavel/diferenca-carros-hibridos-plug-in-carros-eletricos>. Acesso em: 13 mar. 2025.
23. JOHNSON, David. *Fundamentos de análise de circuitos elétricos*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
24. HETH, C. L. Energy on demand: A brief history of the development of the battery. *Substantia*, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 77–86, 2019.
25. KURZWEIL, P. HISTORY | Secondary batteries. In: GARCHE, Jürgen (Ed.). *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Elsevier, 2009.
26. YOSHIDA, Sergio. Fontes de energia e baterias renováveis. *2016 Brazilian Technology Symposium*. 2026.
27. EMBARCADOS. *Baterias de Chumbo Ácido*. Disponível em: <https://embarcados.com.br/baterias-de-chumbo-acido/>. Acesso em: 17 abr. 2025.
28. CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; BARROS, Daniel Chiari; VEIGA, Suzana Gonzaga da. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 37, p. 443-496, mar. 2013. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1511>. Acesso em: 13 mar. 2025.
29. BYD. *Bateria Blade BYD*. Disponível em: [https://www.byd.com/br/bateria-blade?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwqv2\\_BhC0ARIsAFb5Ac88ybV8cv6LdncishA-](https://www.byd.com/br/bateria-blade?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwqv2_BhC0ARIsAFb5Ac88ybV8cv6LdncishA-)

- d\_Voti0cnL76VWpMFk-Q5HF1DFy8c\_UkoAUaAuRDEALw\_wcB#. Acesso em: 17 abr. 2025.
30. Ticianelli, E. A.; Gonzalez, E. R.; *Eletroquímica, Princípios e Aplicações* São Paulo, Edusp, 1998.
  31. Gu, W. B.; Wang, C. Y.; Liaw, B. Y.; *J. Power Sources* **1998**, 75, 151.
  32. KHALIGH, A.; DUSMEZ, S. Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 61, n. 8, p. 3475-3489, 2012.
  33. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Trends in electric vehicle charging*. IEA. *Global EV Outlook 2024*. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>. Acesso em: 13 mar. 2025.
  34. NEOCHARGE. *Tempo de recarga de um carri elétrico*. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tempo-carga-veiculo-eletrico>. Acesso em: 13 mar 2025.
  35. GOLDENTC. *Carregador para carro elétrico*. Disponível em: <https://www.goldentec.com.br/carregador-para-carro-eletrico-22kw-wallbox/p>. Acesso em: 17 abr. 2025.
  36. ELECTROTOPIC. *Por que usamos capacitores em circuitos retificadores*. [S.l.]: Electrotopic, [s.d.]. Disponível em: <https://electrotopic.com/pt/por-que-usamos-capacitores-em-circuitos-retificadores/>. Acesso em: 13 mar. 2025.
  37. ABVE. *Eletropostos*. ABVE. Disponível em: <https://abve.org.br/abve-data/bi-eletropostos/>. Acesso em: 13 mar. 2025
  38. NEOCHARGE. *Tudo sobre carregador rápido DC para carro elétrico*. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carregador-rapido-dc>. Acesso em: 13 mar. 2025.
  39. UNITEK. *Estação De Recarga Carros Elétricos Weg Wemob 150kw Station*. Disponível em: <https://www.unitek.ind.br/estacao-de-recarga-carros-eletricos-weg-wemob-150kw-station>. Acesso em: 17 abr. 2025
  40. BRANDÃO, Dener Augusto de Lisboa. *Carregador veicular ultrarrápido baseado no conversor True Unit Power Factor*. 2021. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/38486/4/Dissertacao\\_DenerBrandao\\_Versao\\_Final.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/38486/4/Dissertacao_DenerBrandao_Versao_Final.pdf). Acesso em: 13 mar. 2025.
  41. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *O Sistema em Números*. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 13 mar. 2025.
  42. ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *PLANO DA OPERAÇÃO ELÉTRICA DE MÉDIO PRAZO DO SIN - PAR/PEL 2024 - CICLO 2025-2029*, 2024. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/>. Acesso em: 13 mar 2025.
  43. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Instalações de Transmissão*. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/instalacoes>. Acesso em: 13 mar. 2025.

44. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica – Módulo 2: Classificação das Instalações*. 2022. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221001\\_2\\_1.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221001_2_1.pdf). Acesso em: 13 mar. 2025.
45. LI, Zhenhe; KHAJEPUR, Amir; SONG, Jinchun. A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. *Energy*. 2019.
46. 99. *99electric-Pro: a categoria exclusiva de carros elétricos da 99*. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://99app.com/motorista/categorias/veiculos-eletricos/>. Acesso em: 13 mar. 2025.
47. INSIDEEVS. *Combustível mais caro? Compare o custo de abastecer e carregar um elétrico*. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/749483/precos-combustiveis-recarga-carros-eletricos/>. Acesso em 17 abr. 2025.
48. NEOCHARGE. *União Europeia caminha para proibir novos carros a gasolina e diesel em 2035*. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/blog/uniao-europeia-proibicao-carro-gasolina-diesel>. Acesso em: 13 mar. 2025.
49. UNIÃO EUROPEIA. *Regulamento (UE) 2023/1804 do Parlamento Europeu e do Conselho de 13 de setembro de 2023 relativo à criação de uma infraestrutura para combustíveis alternativos*. Luxemburgo, 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj?locale=pt>. Acesso em: 13 mar. 2025
50. FOLHA PE. Pernambuco tem recorde no valor da produção agrícola que superou R\$ 7,4 bilhões em 2022. 2023. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/movimento-economico/pernambuco-tem-recorde-no-valor-da-producao-agricola-que-superou-r/292328/>. Acesso em: 13 mar. 2025.
51. SEBRAE. Conheça os 7 principais setores da indústria de Pernambuco. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/pe/artigos/conheca-os-7-principais-setores-da-industrias-de-pernambuco,eb2440a0ca29c810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 13 mar. 2025.
52. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE PERNAMBUCO. *Sistema Rodoviário Estadual – 2023*. Recife, 2023. Disponível em: [https://www.der.pe.gov.br/images/transporte/mapas/Sistema\\_Rodovi%C3%A1rio\\_Estadual\\_-\\_2023-2024\\_v.03.pdf](https://www.der.pe.gov.br/images/transporte/mapas/Sistema_Rodovi%C3%A1rio_Estadual_-_2023-2024_v.03.pdf). Acesso em: 13 mar. 2025.
53. MONTICELLI, A. J. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo: Edgard Blücher, 1983
54. ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Procedimentos de Rede - Submódulo 2.3: Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos, 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-derede/vigentes>. Acesso em: 26 Junho 2024.
55. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Qualidade do Suprimento. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>. Acesso em: 13 mar. 2025.
56. ALVES, André Luiz; SOUZA, Estevão Modolo de. O transformador: teoria, construção e análise do rendimento. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/gfZK5Pm7WkT6wdy9CfmsRDR/>. Acesso em: 13 mar. 2025.