

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS HENRIQUE LEAL

ANÁLISE TÉCNICA SOBRE ASPECTOS DE QUALIDADE DE ENERGIA E EFICIÊNCIA
EM SISTEMAS CONJUGADOS FOTOVOLTAICOS COM ABASTECIMENTO DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS.

CURITIBA
2024

MATHEUS HENRIQUE LEAL

ANÁLISE TÉCNICA SOBRE ASPECTOS DE QUALIDADE DE ENERGIA E EFICIÊNCIA
EM SISTEMAS CONJUGADOS FOTOVOLTAICOS COM ABASTECIMENTO DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS.

Plano de Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado
ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Ênfase
em Eletrotécnica, Setor de Tecnologia, Universidade
Federal do Paraná – Campus Curitiba, como Requisito
Parcial à Obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Gabriel Bianchin

CURITIBA
2024

AGRADECIMENTOS

Este trabalho marca o encerramento de um ciclo extremamente significativo em minha vida, tanto no âmbito profissional quanto pessoal. Com o término desse período, surgem novas oportunidades, desafios inéditos, dificuldades a superar e conquistas a alcançar. Para que eu pudesse concluir a faculdade e finalizar este projeto, muitas pessoas, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu sucesso nessa jornada rumo à graduação em Engenharia Elétrica. O sentimento que prevalece é, sem dúvida, o de gratidão!

Primeiramente, agradeço a Deus por me sustentar nos momentos de alegria e de tristeza, iluminando meu caminho e protegendo-me do mal. Em seguida, não poderia deixar de expressar minha eterna gratidão à minha família. Meu pai, minha mãe, e meus irmãos, pois foram o apoio de vocês, orientando-me para que seguisse pelas melhores caminhos. Esse amor foi minha principal fonte de força para enfrentar os obstáculos que surgiram.

Também quero agradecer aos meus professores, especialmente ao professor Carlos Bianchin, meu orientador, por terem me proporcionado tantas oportunidades de aprendizado e crescimento ao longo do curso. Não poderia deixar de mencionar meus colegas de graduação, com quem formei uma equipe sólida e colaborativa, onde a ajuda mútua prevalecia. Alguns desses colegas se tornaram mais do que companheiros de curso; são amigos que levarei para a vida.

A todos vocês, o meu mais sincero "muito obrigado". Que toda a generosidade e apoio que recebi retornem a vocês em forma de bênçãos incontáveis!

“Se buscar a sabedoria como a prata
e a procurar como se procuram
tesouros escondidos, então você
entenderá o temor do Senhor e
achará o conhecimento de Deus”
(Provérbios, 2:4-5)

RESUMO

As transformações nos sistemas de distribuição de energia elétrica, impulsionadas pelo aumento das unidades de Geração Distribuída (GD), têm alterado significativamente o modelo tradicional de controle e operação do sistema elétrico. A conexão em larga escala dessas unidades apresenta diversos desafios técnicos, econômicos e regulatórios para as distribuidoras, os quais são essenciais para garantir a confiabilidade, continuidade do fornecimento e Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Além disso, o crescimento da frota de veículos elétricos tem acelerado a implementação de estações de recarga, fomentando uma integração ainda mais próxima entre as tecnologias de recarga e GD. Nesse contexto, foi instalada uma estação de recarga em conjunto com um sistema de geração distribuída na unidade LAC do Lactec, configurado no formato carport. O presente trabalho visa analisar os impactos desse sistema, na rede de distribuição, especialmente quanto aos parâmetros de distúrbios harmônicos e de tensão, a partir de dados coletados do Sistema Carport.

Na etapa de análise, tanto em campo quanto em laboratório, os dados foram obtidos utilizando um analisador de qualidade de energia elétrica. Esses dados foram analisados com base em parâmetros-chave de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e comparados aos valores estipulados pelas normas, como o PRODIST da ANEEL e as normas da ABNT, além de outras regulamentações pertinentes.

Palavras-chaves: Geração Distribuída (GD); Qualidade da Energia Elétrica (QEE); Energia Fotovoltaica; Distúrbios Harmônicos; Carport.

ABSTRACT

The transformations in electrical distribution systems, driven by the increase in Distributed Generation (DG) units, have significantly altered the traditional model of electrical system control and operation. The large-scale connection of these units presents various technical, economic, and regulatory challenges for utilities, which are essential to ensure reliability, continuity of supply, and Power Quality (PQ). Additionally, the growing fleet of electric vehicles has accelerated the implementation of charging stations, fostering closer integration between charging and DG technologies. In this context, a charging station was installed together with a distributed generation system at the LAC unit of Lactec, configured in a carport format. This work aims to analyze the impacts of this system on the distribution network, particularly regarding harmonic and voltage disturbances, based on data collected from the Carport System.

In the analysis phase, data were obtained both in the field and in the laboratory using a power quality analyzer. These data were analyzed based on key Power Quality (PQ) parameters and compared to the values established by standards, such as ANEEL's PRODIST and ABNT standards, as well as other relevant regulations.

Keywords: Distributed Generation (DG); Power Quality (PQ); Photovoltaic Energy; Harmonic Disturbances; Carport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Categoria dos Sistemas Fotovoltaicos.....	18
Figura 2: Evolução no Preço da Relação Preço x Watt das Células Fotovoltaicas no Mundo.....	18
Figura 3: Físico Francês Alexandre Edmond Becquerel.....	19
Figura 4: Junção P-N Típica de uma Célula Fotovoltaica.....	20
Figura 5: Potência Instalada (MW) de Geração Distribuída Solar.....	23
Figura 6: Matriz Energética 1970-2050.....	25
Figura 7: Sistema Carport Fábrica da Renault.....	27
Figura 8: Primeiro Carro a Combustão do Mundo.....	28
Figura 9: Veículo Elétrico La Jamais Contente 1899, Velocidade 106 km/h.....	29
Figura 10: Cadillac, 1912.....	30
Figura 11: Tesla Model S 100D.....	31
Figura 12: Pilha de Volta.....	32
Figura 13: Esquemas dos Componentes e Subcomponentes para Montagem de uma Bateria de Íons de Lítio.....	33
Figura 14: Baterias de Íons de Lítio com Planos de Carbono.....	34
Figura 15: Recarregador de VE Utilizado em Residências Domésticas.....	36
Figura 16: Estação de Recarga Rápida.....	37
Figura 17: Venda de Veículos Leves.....	39
Figura 18: Progressão da Frota de Veículos Elétricos.....	40
Figura 19: Reserva de Matéria Prima Utilizada na Produção de Bateria.....	41
Figura 20: Oscilograma com alguns dos principais distúrbios de QEE.....	42
Figura 21: Oscilograma com Componente Fundamental e Harmônicos.....	43
Figura 22: Desequilíbrio Trifásico.....	44
Figura 23: KEYSIGHT N8937APV.....	49
Figura 24: AIW-01-PEM Class A.....	50
Figura 25: SIW500H M3.....	51
Figura 26: CARPORT LAC.....	52
Figura 27: Estação Semirrápida WEG.....	52
Figura 28: Estação Rápida WEG.....	53
Figura 29: Tipos de Plug Estação Rápida WEG.....	53
Figura 30: Circuito de Ensaio do Laboratório.....	54
Figura 31: Curva de MPPT para Ensaio em Laboratório.....	55
Figura 32: Padrão de Entrada do Sistema.....	61
Figura 33: Equipamento de Qualidade de Energia Instalado.....	62
Figura 34: Bobina de Rugowski Instalada.....	62
Figura 35: Tensão Fase Neutro.....	64
Figura 36: Potência Ativa Total.....	65
Figura 37: Potência Ativa Para o Dia 11/11/2024.....	66
Figura 38: Energia Reativa Total.....	67
Figura 39: Desequilíbrio de Tensão.....	68
Figura 40: Desequilíbrio de Corrente.....	69
Figura 41: Distorção Harmônica Total de Tensão.....	70
Figura 42: Distorção Harmônica Total de Corrente.....	71
Figura 43: Corrente Elétrica Total.....	71
Figura 44: Fator de Potência.....	73
Figura 45: Fator de Potência com Estação de Recarga Desligada.....	74
Figura 46: Potência Reativa com Estação de Recarga Desligada.....	75

Figura 47: Fator de Potência Com Geração Solar Desligada.....76

Figura 48: Potência Reativa apenas com a Estação de Recarga de VE.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Fator de Potência.....	22
Tabela 2: Classificação das Recargas de Veículos Elétricos.....	35
Tabela 3: Sequência de fase por ordem harmônica.....	43
Tabela 4: Limites para Desequilíbrio de Tensão.....	45
Tabela 5: Tipos de Fator de Potência.....	46
Tabela 6: Parâmetros do Simulador.....	55
Tabela 7: Dados Analisar de Qualidade Energia Caso A Parte 1(Laboratório).....	56
Tabela 8: Dados Analisar de Qualidade Energia Caso A Parte 2(Laboratório).....	56
Tabela 9: Tabela com Distorções Harmônicas Totais.....	57
Tabela 10: Limites para Flutuação de Tensão.....	58
Tabela 11: Dados Analisar de Qualidade Energia Caso B Parte 1(Laboratório).....	58
Tabela 12: Dados Analisar de Qualidade Energia Caso B Parte 2(Laboratório).....	58
Tabela 13: Valores Mínimos e Máximos de Tensão.....	63
Tabela 14: Faixa de variação de tensão.....	64
Tabela 15: Dados Durante Momento de Maior Demanda.....	66
Tabela 16: Valores Medidos de Frequência.....	72

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica
AIE – Agência Internacional de Energia
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BT – Baixa Tensão
CA – Corrente Alternada
CARB – California Air Resources Board
CC – Corrente Contínua
DHT – Distorção Harmônica Total
FP – Fator de Potência
FV - Fotovoltaica
GD – Geração Distribuída
IEC – Internacional Electrotechnical Commission
IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MME – Ministério de Minas e Energia
MPPT – Maximum Power Point Tracking
MT – Média Tensão
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC – Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE – Qualidade de Energia Elétrica
RN – Resolução Normativa
SF – Sistema Fotovoltaico
SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado na Rede
SFI – Sistema Fotovoltaico Isolado
SPMP – Segmento do Ponto de Máxima Potência
UC – Unidade Consumidora
UFV – Usina Fotovoltaica
VE – Veículo Elétrico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.1 OBJETIVO ESPECIFICO.....	15
2. REFERÊNCIA TEÓRICA.....	17
2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICOS.....	17
2.1.1 História.....	19
2.1.2 Geração Distribuída.....	21
2.1.3 Geração Distribuída no Contexto do Brasil: Crescimentos, Normatização, Mercado Atual e Futuro.....	22
2.1.4 Conexão com Veículos Elétricos: Carport.....	26
2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	27
2.2.1 História.....	28
2.2.2 Baterias.....	31
2.2.3 Recarga.....	35
2.2.4 Regulamentação.....	37
2.2.5 Atualidade no Brasil.....	39
2.3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	41
2.3.1 Distorção Harmônica.....	42
2.3.2 Desequilíbrio.....	44
2.3.3 Fator de Potência/ Reativo.....	45
2.3.4 Demanda.....	47
3. RECURSOS.....	49
3.1 SIMULADOR DE GERADOR FOTOVOLTAICO.....	49
3.2 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	50
3.3 INVERSOR FOTOVOLTAICO.....	50
3.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	51
3.6 CARREGADOR RÁPIDO.....	53
4. RESULTADOS.....	54
4.1 LABORATÓRIO.....	54
4.1.1 Circuito de Medição.....	54
4.1.2 Parâmetros.....	54
4.1.3 Resultados.....	56
4.2 CAMPO.....	60
4.2.1 Circuito de Medição.....	60
4.2.2 Parâmetros.....	62
4.2.3 Resultados.....	63
5. CONCLUSÃO.....	78
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	79
ANEXO A – FICHA TÉCNICA INVERSOR SIW500H M3.....	85
ANEXO B – Diagrama Unifilar Parte A.....	86
ANEXO C – Diagrama Unifilar Parte B.....	87

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma crescente preocupação com os impactos ambientais, a pegada de carbono, a emissão de gases poluentes e muitos outros fatores que afetam as condições ambientais em nosso planeta. Essa preocupação tem se intensificado devido ao aumento significativo da poluição que se observa nas últimas décadas, afetando diversas esferas ambientais, como o ar, a água e o solo. Este cenário alarmante tem levado a uma conscientização global sobre a necessidade urgente de adotar práticas mais sustentáveis. Como resultado desse aumento da poluição, tem surgido uma busca por tecnologias mais eficientes e menos poluentes. Exemplos notáveis incluem os sistemas fotovoltaicos (SF), que utilizam a energia solar para gerar eletricidade de maneira limpa e renovável, e os veículos elétricos (VE), que reduzem significativamente a emissão de gases de efeito estufa em comparação com os veículos movidos a combustíveis fósseis. Além dessas, muitas outras tecnologias emergentes estão sendo desenvolvidas com o objetivo de mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade.

Os sistemas fotovoltaicos (SF) têm ganhado destaque pela capacidade de aproveitar uma fonte de energia abundante: o sol. Essa tecnologia teve início em 1839, quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel descobriu que certos materiais produzem energia elétrica ao serem expostos à luz (Fernando Câmara, 2011). Desde então, as células fotovoltaicas têm sido amplamente pesquisadas e desenvolvidas, atingindo níveis de eficiência e potência que as tornaram uma opção atraente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a pegada de carbono. De acordo com um estudo da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2021), “o uso de sistemas fotovoltaicos está crescendo exponencialmente, impulsionado pela queda nos custos de instalação e pelos benefícios ambientais”. Além disso, incentivos governamentais e a redução dos custos com a fatura de energia têm incentivado um número crescente de grandes, médias e pequenas empresas, bem como residências, a adotarem sistemas fotovoltaicos. A adoção desta solução energética tem crescido significativamente, impulsionada pela economia gerada na conta de energia elétrica e pelos benefícios ambientais associados.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois grupos: o primeiro, conectado à rede elétrica de distribuição (on-grid), e o segundo, que opera isolado, ou

seja, sem ser conectado à rede de energia (off-grid). Independente do tipo de instalação em que o sistema fotovoltaico se encontra, ele terá obrigatoriamente dois equipamentos fundamentais: os módulos fotovoltaicos e os inversores solares. O primeiro equipamento, também chamado de placa solar, contém células solares feitas de materiais semicondutores como o silício. Quando expostas à luz solar, essas células geram uma corrente elétrica através do efeito fotovoltaico. Esta corrente gerada nos leva ao segundo equipamento fundamental, o inversor solar. A corrente gerada pelos módulos é corrente contínua (CC) e, para ser utilizada, precisa ser transformada em corrente alternada (CA). Portanto, o inversor é responsável por converter a corrente CC em CA. Além de realizar este processo de conversão, o inversor também é responsável pelo pareamento com a rede elétrica já existente, garantindo a sincronização adequada da energia gerada pelo sistema fotovoltaico com a rede de energia elétrica. Isso inclui o controle da frequência e da tensão da corrente alternada para assegurar que a energia gerada não interfira no funcionamento da rede elétrica e atenda aos requisitos de qualidade e segurança estabelecidos pelas concessionárias de energia.

Os veículos elétricos são outro exemplo claro de uma tecnologia emergente que, embora tenha começado há bastante tempo, só recentemente ganhou destaque no mercado global. O avanço tecnológico e a evolução dos equipamentos têm impulsionado essa tendência, que é ainda mais acentuada por motivos ambientais, como a redução das emissões de poluentes e gases de efeito estufa. Esse cenário tem contribuído para um crescimento exponencial da adoção de veículos elétricos em todo o mundo.

A história dos veículos elétricos começou no início do século XIX, com Alessandro Volta demonstrando a possibilidade de armazenar energia elétrica quimicamente e Michael Faraday desenvolvendo os princípios dos motores elétricos (Ferreira & Dias, 2020). Nos anos 1830, surgiram os primeiros modelos experimentais de veículos elétricos, como os de Ányos Jedlik e Thomas Davenport (Bail, 2021). Entre 1880 e 1900, conhecida como a “idade de ouro” dos veículos elétricos, esses carros ganharam popularidade, especialmente nos EUA e na Europa, com a França liderando a produção mundial. Entretanto, o avanço dos motores a combustão interna, aliado à produção em massa de veículos como o Ford Model T, fez com que os veículos elétricos perdessem espaço no mercado devido ao menor custo e maior autonomia dos carros a gasolina. A partir dos anos 1960, o crescente interesse por soluções sustentáveis e a preocupação com a poluição trouxeram um renascimento dos veículos elétricos, intensificado pelos avanços nas tecnologias de baterias nas décadas seguintes.

Portanto, com o aumento dos veículos elétricos impulsionado pelo avanço tecnológico e pelas crescentes preocupações ambientais, o número de automóveis elétricos aumentou significativamente. No entanto, esse crescimento trouxe novos desafios, principalmente relacionados à infraestrutura de carregamento. A expansão rápida da frota elétrica exige uma rede de estações de recarga mais ampla e acessível, mas a infraestrutura atual ainda é insuficiente em muitos lugares, causando preocupações sobre a disponibilidade de pontos de recarga. Além disso, o tempo necessário para recarregar totalmente um veículo elétrico pode ser uma limitação significativa em comparação com o abastecimento rápido dos veículos a combustão, o que exige avanços tecnológicos adicionais em baterias e estações de carregamento de alta potência.

Uma das soluções adotadas para enfrentar o desafio da infraestrutura de carregamento dos veículos elétricos foi a instalação de postos de recarga automotiva, especialmente em combinação com sistemas de geração distribuída usando painéis fotovoltaicos. Ao integrar sistemas fotovoltaicos, esses postos de recarga não apenas proporcionam energia limpa e renovável para os veículos, mas também contribuem para reduzir a sobrecarga na rede elétrica tradicional. Assim, a junção da mobilidade elétrica com a energia solar se torna uma estratégia sustentável, promovendo uma solução integrada que atende à crescente demanda por pontos de recarga e, ao mesmo tempo, maximiza os benefícios ambientais e econômicos dos sistemas de energia solar.

O princípio de funcionamento desses postos de recarga é baseado na combinação de energia gerada pelos painéis solares e a rede elétrica convencional. Durante o dia, os painéis fotovoltaicos captam a luz solar e a convertem em energia elétrica, que é usada diretamente para carregar os veículos elétricos. Se houver excesso de energia, ela pode ser armazenada em baterias para uso posterior ou enviada de volta à rede elétrica. À noite ou em dias nublados, quando a geração solar é insuficiente, a energia necessária para a recarga é complementada pela rede elétrica, garantindo que os veículos possam ser carregados a qualquer momento. Essa integração otimiza o uso de recursos naturais, reduz os custos de energia e contribui para uma mobilidade mais sustentável.

No entanto, devido ao fato de os veículos elétricos possuírem sistemas de bateria altamente desenvolvidos, é essencial manter uma qualidade de energia muito elevada nesses sistemas combinados. Dessa forma, já existem várias normas que abordam, de forma específica, a qualidade da energia utilizada em sistemas fotovoltaicos. Essas

normas definem padrões e limites para sobretensão, sobrecorrente e diversos outros parâmetros necessários para garantir o funcionamento seguro e eficiente desse sistema.

Além disso, existem regulamentações que tratam especificamente dos postos de recarga de veículos elétricos de forma integrada e detalhada. Um exemplo é a norma ABNT NBR IEC 61851. Essas regulamentações garantem que os postos de recarga operem dentro dos padrões necessários para manter a qualidade da energia e assegurar o desempenho ideal dos veículos.

Com base nos tópicos abordados acima, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho e a eficiência dos postos de recarga de veículos elétricos. A proposta é analisar o maior número possível de informações e resultados, a fim de avaliar a qualidade da energia fornecida e identificar possíveis fatores que possam reduzir o desempenho do sistema ou prejudicar a recarga, bem como, causar danos à rede de energia elétrica. Dessa forma, será possível concluir a análise do sistema integrado e fornecer um resultado definitivo sobre a eficiência e a eficácia desses postos de recarga.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência e a qualidade de energia de sistemas combinados de geração de energia solar e carregamento de veículos elétricos. A pesquisa envolve a comparação de dados obtidos em laboratório e em campo, com o propósito de discutir aspectos como sobretensão, distorção harmônica entre outros. A partir dessa análise, serão apresentadas conclusões e propostas de soluções e melhorias para otimizar o desempenho do sistema.

1.1 OBJETIVO ESPECIFICO

Temos os seguintes objetivos específicos escolhidos.

- Os objetivos específicos deste estudo incluem uma análise detalhada do princípio de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, abrangendo os principais equipamentos e tecnologias que compõem esses sistemas.

- Será realizado um estudo das tecnologias utilizadas em veículos elétricos, com ênfase nas baterias e nos sistemas de carregamento, visando uma compreensão aprofundada de seus parâmetros e funcionamento.
- Outro objetivo é explorar a integração de postos de abastecimento que utilizam sistemas fotovoltaicos para o carregamento de veículos elétricos, destacando tanto os benefícios quanto os desafios dessa combinação. Serão analisados exemplos de implementação e a performance desses sistemas conjugados.
- O estudo também visa avaliar a eficiência energética desses sistemas combinados, medindo a quantidade de energia fornecida e considerando fatores como estabilidade da tensão, frequência e a presença de distúrbios elétricos. Além disso, será feita uma comparação desses parâmetros com os padrões de qualidade de energia estabelecidos.
- Para a realização dos experimentos, serão definidos os parâmetros específicos a serem medidos, como potência gerada, eficiência de conversão e estabilidade da tensão, além de serem listados os equipamentos necessários, como inversores e circuitos.
- A coleta e análise dos dados obtidos a partir dos experimentos realizados em laboratório e em campo também é um objetivo deste trabalho, com o intuito de comparar esses resultados com normas e identificar tendências, padrões e possíveis anomalias.
- Por fim, com base nos dados analisados, serão sugeridas melhorias para aumentar a eficiência e a qualidade de energia dos sistemas combinados, propondo soluções para mitigar os problemas identificados ao longo do estudo.

2. REFERÊNCIA TEÓRICA

2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos vêm ganhando destaque e se popularizando cada vez mais ao longo dos anos, tornando-se uma opção acessível para um número crescente de pessoas como relatado em Stec e Coube (2021). Mas afinal, o que é um sistema fotovoltaico, como ele funciona e por que tem atraído tanto a atenção do público em geral? Essas são algumas das questões relevantes que podem ser levantadas sobre essa tecnologia de geração de energia. Contudo, há muitos outros aspectos que podem ser explorados, como os benefícios ambientais, econômicos e sociais que esses sistemas proporcionam, além dos desafios e oportunidades que surgem com sua crescente adoção.

Segundo Stec e Coube (2021), o princípio básico de um sistema fotovoltaico é a utilização da energia gerada pelo sol, que é captada e convertida em energia elétrica, podendo ser utilizada em equipamentos elétricos e eletrônicos. Essa captura ocorre por meio de placas solares feitas de material semicondutor, que geram um fenômeno que ficou conhecido como efeito fotoelétrico.

Uma explicação mais detalhada revela que os semicondutores ocupam uma posição intermediária entre os metais condutores e os metais isolantes. Quando os raios solares atingem a junção PN do material semicondutor, a energia é transferida para os elétrons livres, o que gera uma corrente elétrica e, conseqüentemente, produz energia.

Após muitos avanços tecnológicos foi observado que o uso das placas solares poderia ter aplicações diferentes assim sendo dividido em grupos. Os dois principais grupos são os sistemas conectados à rede (SFCR), muito comuns em grandes centrais e centros urbanos, e os sistemas isolados (SFI), que são mais utilizados em aplicações individuais e minirredes. Conforme destacado por Stec e Coube (2021), essa divisão reflete as diferentes necessidades e contextos de aplicação dos sistemas fotovoltaicos.

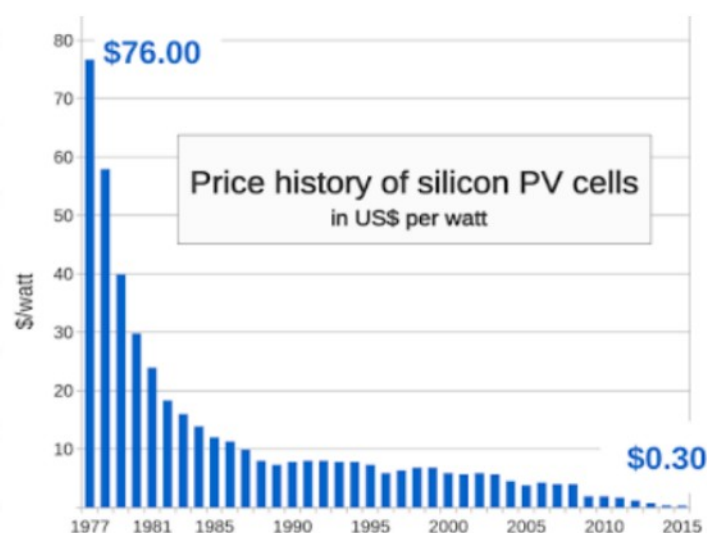
Figura 1: Categoria dos Sistemas Fotovoltaicos



Fonte: STEC e COUBE, 2021

Atualmente, devido a uma combinação de fatores como as mudanças climáticas, a busca por independência energética, políticas públicas favoráveis, a queda nos preços dos módulos fotovoltaicos, o avanço tecnológico e a redução das barreiras técnicas na implementação de sistemas, a energia fotovoltaica tornou-se o segmento energético de maior crescimento no mundo conforme BORGES, (2019). A Figura 2 ilustra a significativa diminuição nos custos para a geração de 1 Watt de energia, impulsionada pelo desenvolvimento contínuo de tecnologias em sistemas fotovoltaicos (SF). Esse cenário reflete a crescente competitividade dessa fonte renovável no mercado global, destacando seu papel crucial na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Figura 2: Evolução no Preço da Relação Preço x Watt das Células Fotovoltaicas no Mundo.



Fonte: BORGES, 2019

2.1.1 História

Os primeiros registros e observações do efeito fotoelétrico foram feitos pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839 (Figura 3). Durante experimentos eletroquímicos, ele acidentalmente descobriu que, ao expor eletrodos de platina ou prata à luz solar, ocorria uma diferença de potencial na placa, induzindo uma corrente elétrica. Em outras palavras, Becquerel descobriu o efeito fotoelétrico sem querer, ainda no século XIX, conforme relata Santiago (2019).

Figura 3: Físico Francês
Alexandre Edmond Becquerel



Fonte: Blog AMIM

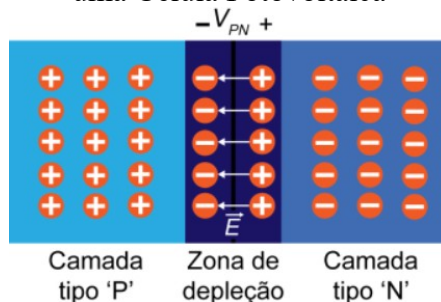
Alguns anos após a descoberta do efeito fotoelétrico por Becquerel, dois físicos desempenharam um papel crucial no desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos: o professor William Grylls Adams e seu aluno Richard Evans Day. Eles criaram o primeiro dispositivo capaz de produzir energia a partir do efeito fotoelétrico em 1877. Conforme relata Camara (2011), esse dispositivo consistia em um filme de selênio depositado sobre um filme de ferro, com um segundo filme de ouro semitransparente que servia como contato frontal para a incidência de luz. Apesar de sua baixa eficiência de apenas 0,5%, esse dispositivo marcou um avanço significativo no campo da energia solar.

Em 1883, apenas seis anos após a criação do primeiro dispositivo fotovoltaico, o inventor Charles Fritts também utilizou o selênio para dobrar a eficiência, alcançando 1%. Ele construiu a primeira célula fotovoltaica, e, apesar da baixa eficiência, esses dispositivos rapidamente encontraram uma aplicação industrial. No final do século XIX, o

engenheiro alemão Werner Siemens começou a comercializar as primeiras células de selênio equipadas com fotômetros para máquinas fotográficas, conforme mencionado por Santiago (2019).

Camara (2011) relata que, em 1953, o químico Calvin Fuller, do Bell Laboratories, desenvolveu um processo inovador de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, controlando suas propriedades elétricas em um procedimento conhecido como “dopagem”. Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, tornando-a condutora, com cargas móveis positivas, caracterizando-a como silício do “tipo p”. Seguindo as orientações de Fuller, o físico Gerald Pearson, seu colega nos Bell Labs, imergiu essa barra de silício dopado em um banho quente de lítio. Isso criou, na superfície da barra, uma zona com excesso de elétrons livres, resultando em uma região de silício do “tipo n”, que possui portadores de carga negativa. Na interface entre o silício “tipo n” e o silício “tipo p”, conhecida como “junção p-n”, formou-se um campo elétrico permanente conforme a Figura 4.

Figura 4: Junção P-N Típica de uma Célula Fotovoltaica



Fonte: Blog Eletrônica de Potência (Moraes)

Dessa maneira, descobriu-se que a eficiência das placas de silício poderia atingir 4%, o que seria quatro vezes maior do que a eficiência das placas de selênio, conforme descrito por Câmara (2011). O autor também menciona que Fuller aprimorou a célula solar ao dopá-la com fósforo, resultando em uma junção p-n mais estável. Posteriormente, ele substituiu o gálio por arsênio, formando um substrato do tipo n. Em seguida, aplicou uma difusão de boro, criando uma camada do tipo p na superfície. Essas inovações tornaram as células solares mais fáceis de soldar e elevaram a eficiência a um recorde de 6%. Os resultados foram apresentados na reunião anual da National Academy of Sciences em 1954 e publicados no Journal of Applied Physics. A patente foi registrada, e as figuras mencionadas incluem imagens históricas do primeiro módulo solar, além de documentos do projeto.

As células fotovoltaicas tiveram sua primeira aplicação em redes telefônicas em 1955, mas o projeto não foi levado adiante devido ao alto custo e ao retorno limitado. No entanto, elas encontraram uma aplicação promissora no espaço, especialmente como fonte de energia para satélites e módulos espaciais. As primeiras missões a utilizarem essa tecnologia foram a Vanguard I, o Sputnik-3, entre outras que se seguiram nas décadas seguintes. A descoberta dessa nova utilidade impulsionou a pesquisa e o desenvolvimento no campo das células solares, conforme destacado por Santiago (2019).

Após esse período, diversos cenários globais impulsionaram ainda mais a pesquisa e o desenvolvimento das placas solares. Entre eles, destaca-se a crise do petróleo de 1973 e, posteriormente, a crescente preocupação com as mudanças climáticas devido à queima de combustíveis fósseis, especialmente a partir da década de 1990. Esses fatores levaram a grandes avanços na tecnologia solar, culminando em configurações mais complexas, como as células solares em cascata (*in tandem*). Essas células consistem na sobreposição de várias camadas semicondutoras, cada uma otimizada para um comprimento de onda específico da radiação solar, permitindo alcançar rendimentos de conversão superiores a 34%, conforme descrito por Câmara (2011).

2.1.2 Geração Distribuída

Geração distribuída refere-se à produção de energia em pequenas escalas, destinada a consumidores isolados ou integrados à rede elétrica. Nessa modalidade, a geração de energia ocorre próxima à unidade consumidora e pode ser aplicada em diversos setores, como indústria, comércio e residências. É válida para diferentes fontes de energia renovável, como solar, eólica e hídrica. No Brasil, a definição de geração distribuída está regulamentada pelo Artigo 14 do Decreto-Lei n.º 5.163 de 2004 (ANEEL, n.d.).

Quando a geração é integrada à rede da concessionária, é possível obter benefícios, como a compensação na conta de energia, entre outros incentivos. Conforme Stec e Coube (2021), o crescimento da geração distribuída tem se tornado cada vez mais acentuado devido à significativa redução nos custos. No entanto, as regulamentações relacionadas à geração distribuída ainda estão em desenvolvimento e em constante mudança, pois se trata de uma prática relativamente nova. Por isso, muitas leis atuais não cobrem todos os detalhes específicos dessa modalidade.

Para além dos aspectos regulatórios, a geração distribuída também se destaca por suas contribuições ao desenvolvimento sustentável. A proximidade entre a geração e o consumo reduz perdas no transporte de energia, que ocorrem em sistemas centralizados de grande escala (Moura et al., 2018). Isso significa maior eficiência no uso dos recursos e uma menor pegada de carbono, alinhando-se às diretrizes globais de redução de emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2021). Além disso, a geração distribuída pode proporcionar maior segurança energética ao diversificar as fontes de energia e descentralizar a produção, reduzindo a dependência de grandes usinas e diminuindo os impactos de possíveis falhas no sistema (Galdino & Silva, 2020).

Outro ponto relevante é o impacto econômico positivo que a geração distribuída pode ter nas comunidades locais. A instalação de sistemas de geração de energia, como painéis solares em residências ou pequenas turbinas eólicas em propriedades rurais, pode gerar empregos diretos e indiretos (Almeida & Ribeiro, 2019). Além disso, ao permitir que os consumidores produzam sua própria energia, há uma redução na dependência das concessionárias e, em muitos casos, economia na conta de luz (Souza & Fernandes, 2020). Com o avanço das tecnologias e a maior acessibilidade a essas soluções, a tendência é que a geração distribuída continue a crescer, contribuindo para um sistema energético mais resiliente e sustentável (Stec & Coube, 2021).

Podemos diferenciar os sistemas de geração em algumas categorias conforme sua potência instalada de geração, essa classificação é feita pela ANEEL, e a categorização ficaria conforme a Tabela 1, importante destacar que a microgeração e minigeração são classificadas como GD porém, usinas de geração não podem receber esta nomenclatura e consequentemente não está sujeita as mesmas normativas.

Tabela 1: Tipos de Fator de Potência

CATEGORIA	POTÊNCIA INSTALADA
MICROGERAÇÃO	Até 75 kW
MINIGERAÇÃO	Acima de 75 kW até 5 MW
USINA DE GERAÇÃO	Acima de 5 MW

Fonte: Autor

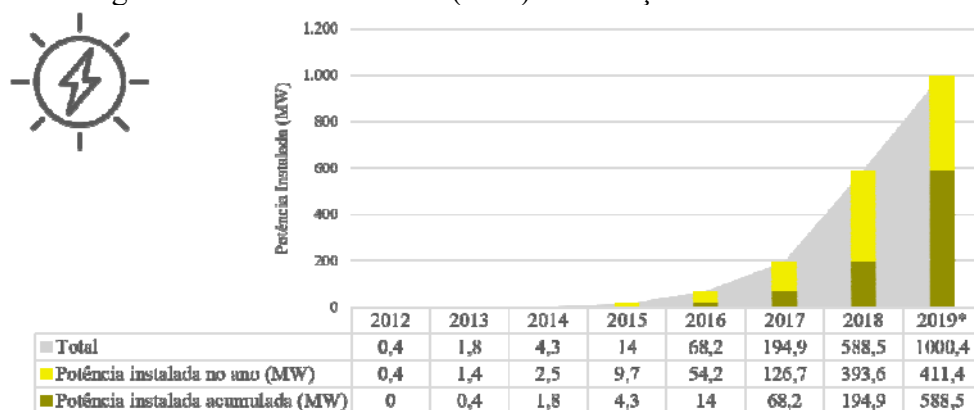
2.1.3 Geração Distribuída no Contexto do Brasil: Crescimentos, Normatização, Mercado Atual e Futuro

No Brasil, ao contrário de muitos países asiáticos e europeus, a energia solar demorou a se desenvolver e se popularizar. Um dos principais motivos por trás dessa

demora é o fato de a matriz energética brasileira já ser amplamente baseada na energia hidráulica, devido à abundância de usinas hidrelétricas no país, conforme apontado por (Junior, 2013). No entanto, essa realidade vem mudando gradualmente, impulsionada por incentivos governamentais, a viabilização dessas tecnologias no Brasil, a crescente redução nos custos e o aumento da eficiência das células e painéis solares, além do enorme potencial de radiação solar no território brasileiro.

Com o crescimento dos sistemas de geração fotovoltaica, a capacidade instalada de geração distribuída tem aumentado significativamente ao longo do tempo. De acordo com (Santiago, 2019), 90% da capacidade instalada de geração distribuída é composta por sistemas que utilizam tecnologia para produzir eletricidade a partir da energia solar.

Figura 5: Potência Instalada (MW) de Geração Distribuída Solar



Fonte: SANTIAGO, 2019

Atualmente, aproximadamente 70% dos municípios brasileiros já possuem pelo menos um sistema de energia solar fotovoltaica integrado à rede elétrica (Santiago, 2019). A região Sudeste concentra a maior fatia (cerca de 45%) dos sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração distribuída, seguida pelas regiões Sul (23%) e Nordeste (17%). Os estados que mais avançaram na adoção da tecnologia fotovoltaica por meio do micro e minigeração são: Minas Gerais, liderando com cerca de 190 MW instalados (19,4% do total no país), Rio Grande do Sul, em segundo lugar, com 157 MW (16,1%), e São Paulo, em terceiro, com 123 MW (12,5%). Esses três estados, em conjunto, respondem por aproximadamente 52% das unidades consumidoras conectadas à rede que utilizam a energia solar fotovoltaica para gerar e consumir eletricidade, sendo compensadas com créditos pela energia produzida.

Conforme a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), o crescimento do mercado de geração distribuída solar fotovoltaica no Brasil, se mantido o

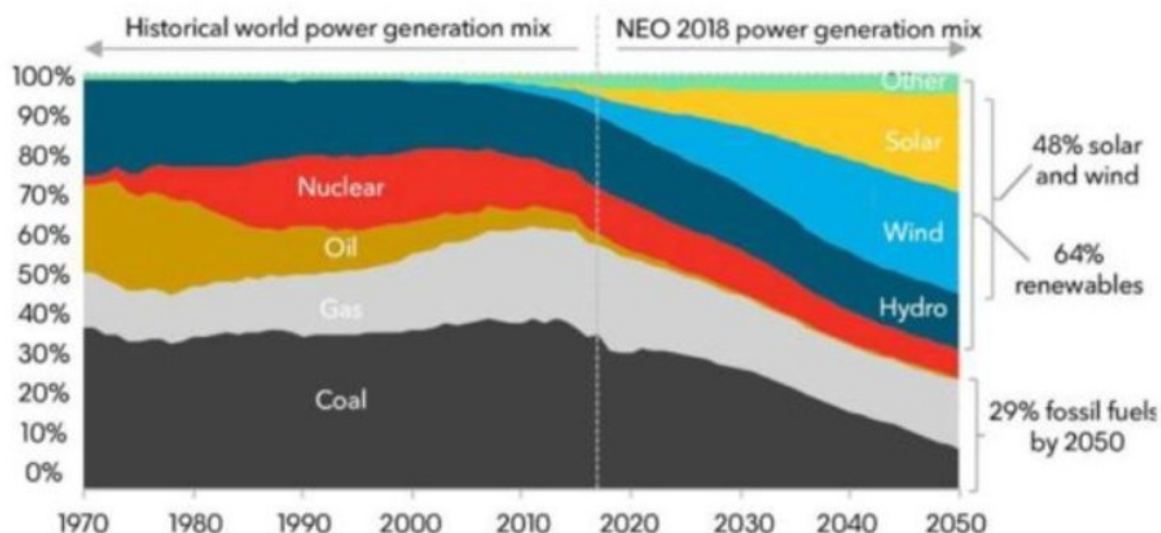
atual sistema regulatório de compensação total, poderá gerar mais de R\$ 25 bilhões em arrecadações de impostos para os governos federal e estaduais até 2035 (ABSOLAR, 2019). Além disso, a geração de empregos é um fator determinante nas discussões sobre o modelo regulatório vigente e suas futuras alterações. Estima-se que, para cada MW de energia solar FV instalado, sejam criados entre 25 e 30 postos de trabalho no mundo, abrangendo atividades como instalação, fabricação, vendas, distribuição e desenvolvimento de projetos, entre outras.

Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica tem ganhado destaque nas pesquisas e inovações tecnológicas em energias renováveis, com ênfase na melhoria de componentes como módulos e inversores, buscando maior eficiência e redução nos custos de produção. Vantagens como alto rendimento energético, modularidade, baixo custo operacional e manutenção, além dos benefícios ambientais e segurança energética, tornam essa fonte atraente. A partir de 2020, com o avanço de novas tecnologias e incentivos fiscais, a energia solar fotovoltaica tem crescido expressivamente no Brasil, consolidando-se como a segunda maior em potência instalada na matriz elétrica nacional. As tecnologias atuais são escaláveis, de fácil manutenção e possuem uma vida útil de até 25 anos (Dias, 2023).

A energia solar fotovoltaica, além de ser uma solução sustentável, está impulsionando avanços tecnológicos e gerando impactos econômicos significativos no Brasil. A evolução contínua das células solares, como o aumento das dimensões das células com a tecnologia Half Cell e as inovações em inversores híbridos, estão tornando o setor cada vez mais eficiente e acessível. Essa evolução não só reduz os custos de produção, mas também melhora o desempenho energético, o que é essencial para o crescimento do mercado. Além disso, as projeções econômicas para o setor são promissoras, com a expectativa de geração de mais de 300 mil empregos e investimentos que devem ultrapassar R\$ 50 bilhões até o final de 2023. Esse cenário reflete o papel estratégico da energia solar na diversificação da matriz elétrica brasileira e no fortalecimento da economia, demonstrando como a tecnologia fotovoltaica pode ser um motor para o desenvolvimento social, econômico e ambiental no país (Santiago, 2019).

Esses impactos para o futuro não se limitam apenas ao Brasil. Com o objetivo de transformar a matriz energética global, foram criados planos para substituir a dependência predominante de carvão e gás por soluções energéticas renováveis. O objetivo é que, até 2050, mais de 50% da matriz energética global seja composta por fontes renováveis, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6: Matriz Energética 1970-2050



Fonte: ALVES, 2018

Com o crescimento da geração distribuída no país, diversas normas e legislações foram criadas e modificadas à medida que o número de instalações e a capacidade instalada aumentavam. Nesse contexto, as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, assim como o sistema de compensação de energia elétrica, foram regulamentadas. Conforme discutido por Borges (2019), a ANEEL publicou a Resolução Normativa 687 de 2015, que alterou a Resolução Normativa 482 de 2012, além dos módulos 1 e 3 do PRODIST. Atualmente, a norma vigente para os procedimentos de acesso da geração distribuída à rede elétrica de distribuição é a RN 687. Os textos dos módulos 1 e 3 do PRODIST que não foram alterados continuam em vigor para esses procedimentos.

A Resolução Normativa 687/2015 teve como objetivo tornar a geração distribuída (GD) no Brasil mais atrativa para pequenos e grandes consumidores, reduzindo custos, tempo de conexão e preenchendo lacunas deixadas por legislações anteriores. Uma das principais inovações trazidas por essa normativa foi permitir que a GD fosse implementada em empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, além de possibilitar a geração compartilhada. Nesse modelo, consumidores podem se unir, formando consórcios ou cooperativas, e instalar uma unidade de micro ou minigeração, usufruindo, cada membro, de sua parcela do crédito gerado, conforme explicado por Santiago (2019).

A Resolução Normativa 687 estabelece diretrizes para o dimensionamento do circuito de conexão à rede, determinando a quantidade de fases e o nível de tensão conforme as características técnicas da rede, a serem definidos pela distribuidora, de

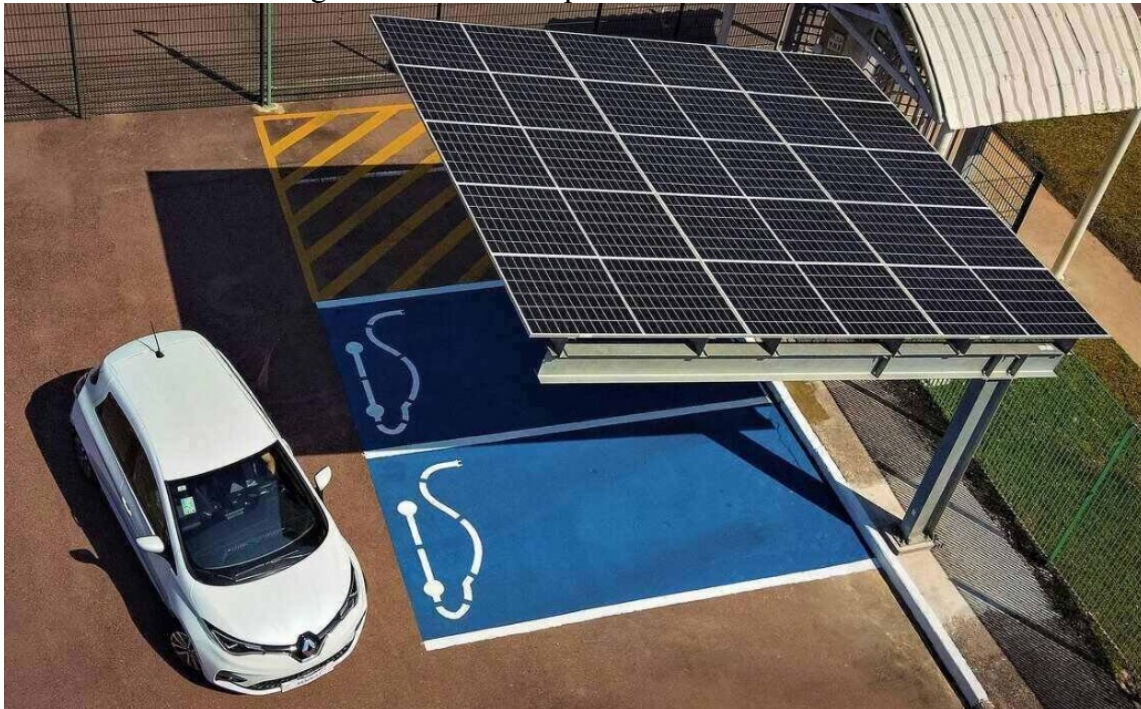
acordo com a regulamentação vigente. Em relação aos equipamentos necessários, a RN 687 classifica esses dispositivos com base na potência do sistema. Com o avanço tecnológico dos inversores fotovoltaicos, muitos dos componentes mencionados agora estão integrados aos inversores, tornando o sistema mais robusto, com menos equipamentos instalados separadamente e maior confiabilidade operacional. Além disso, a norma também regula os dispositivos de potência que devem ser utilizados (Borges, 2019).

Para a conexão com a rede elétrica, o sistema de compensação de energia permite que o excedente de potência ativa gerado pela geração distribuída (GD) seja compensado. A energia não utilizada pela unidade consumidora pode ser comercializada, mas, para fins de compensação, a energia injetada no sistema de distribuição é considerada um empréstimo gratuito à distribuidora. Isso gera créditos em energia que podem ser utilizados em até 60 meses, em vez de um pagamento monetário. Esses créditos podem ser aplicados para abater o consumo de outra unidade consumidora, mesmo com titularidades diferentes, conforme a Resolução Normativa 687/2015. Essa flexibilidade no modelo de negócios da GD tem incentivado a adoção da tecnologia, facilitando a difusão de modalidades como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, onde cada unidade utiliza energia de forma independente; autoconsumo remoto, que permite a compensação de energia entre unidades com a mesma titularidade, mesmo que localizadas em áreas diferentes dentro da mesma concessão; e geração compartilhada, na qual consumidores organizados em consórcios ou cooperativas compartilham os créditos de energia gerada (Borges, 2019).

2.1.4 Conexão com Veículos Elétricos: Carport

De acordo com Ribeiro, Florian e Figueira (2022), o sistema Carport Solar é uma estrutura desenvolvida com dois objetivos interligados. O primeiro é fornecer uma estrutura metálica equipada com painéis fotovoltaicos, que oferece sombreamento para veículos elétricos. O segundo objetivo é utilizar os módulos solares para gerar energia elétrica, que pode ser injetada na rede elétrica ou utilizada para recarregar os veículos elétricos estacionados sob a estrutura. Esse sistema segue um padrão bem definido, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Sistema Carport Fábrica da Renault



Fonte: Automotive Business, 2021

Atualmente, no Brasil, com o crescimento dos veículos elétricos, muitos locais públicos e empresas estão adotando o sistema Carport Solar para maximizar o uso dos espaços. Um exemplo disso é o uso desse sistema pela Renault, conforme mostrado na Figura XX acima. Segundo Kawasaki (2022), empresas começaram a comercializar esses sistemas, oferecendo kits prontos para instalação, que incluem desde os painéis fotovoltaicos até a estrutura metálica.

2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS

A mobilidade elétrica envolve a transição do transporte tradicional para o uso de energia elétrica como fonte para sistemas de propulsão de veículos. Isso abrange uma ampla gama de aplicações, incluindo o transporte de pessoas, o deslocamento de cargas e operações específicas em setores como a mineração. Ao adotar motores elétricos, substitui-se total ou parcialmente os motores de combustão interna, que dependem de combustíveis fósseis como o petróleo, pela energia elétrica (PROMOB, 2017-2021).

Essa mudança não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também diminui significativamente a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo de

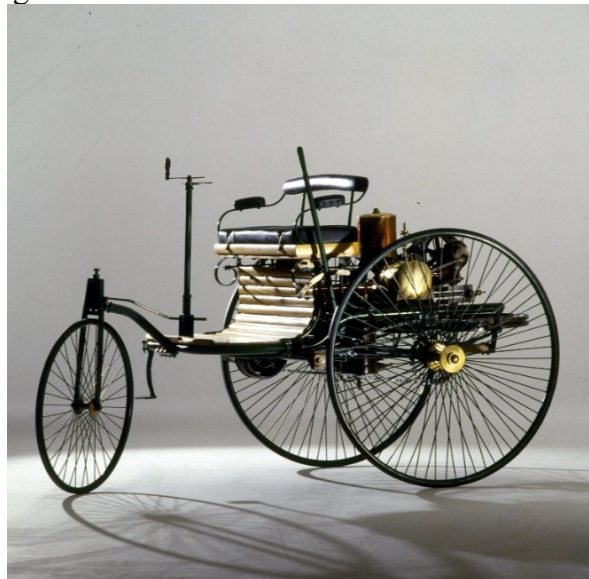
forma substancial para a mitigação do aquecimento global. Além disso, a eletrificação do transporte traz benefícios adicionais, como a melhoria da qualidade do ar, a redução da poluição sonora e a potencial integração com fontes de energia renovável, tornando-se um componente vital na busca por um futuro mais sustentável.

No entanto, não será possível eliminar completamente as emissões de gases de efeito estufa e a pegada de carbono apenas com a transição para veículos elétricos. Para alcançar uma redução total, seria necessário mudar drasticamente nossa matriz energética, o que implica transformar a fonte inicial de energia utilizada para gerar eletricidade. Isso envolve a substituição de fontes de energia fóssil, como carvão e petróleo, por fontes renováveis, como solar, eólica e hidroelétrica. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), a descarbonização completa só será viável com uma combinação de tecnologias de energia limpa, eficiência energética e mudanças estruturais na geração e consumo de energia.

2.2.1 História

Embora muitos acreditem que os veículos elétricos sejam uma tecnologia recente, na verdade, eles surgiram em meados do século XIX, marcando a primeira fase dos veículos elétricos. Segundo Noce (2009), em 1837, na Inglaterra, foi construída a primeira carruagem elétrica, antecedendo em quase 40 anos o primeiro automóvel com motor de combustão interna, o Patent-Motorwagen de Karl Benz (Figura 8), criado em 1886.

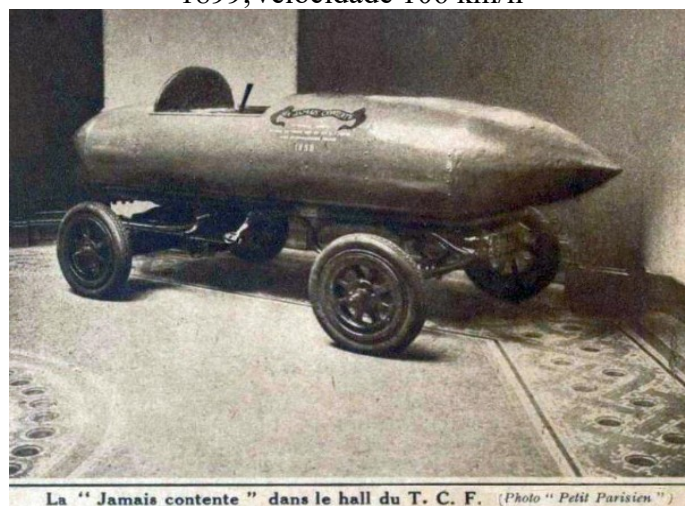
Figura 8: Primeiro Carro a Combustão do Mundo



Fonte: Summit Mobilidade, 2021

Na mesma época, em 1859, foi desenvolvida a bateria de chumbo-ácido, que impulsionou o desenvolvimento de diversos veículos elétricos na Europa e nos Estados Unidos a partir da década de 1880. Em 1897, Londres já contava com uma frota de táxis elétricos (Noce, 2009), e entre 1890 e 1910, esses veículos ganharam popularidade devido à ausência dos inconvenientes dos motores de combustão interna e externa, como barulho, fumaça, e o risco de incêndios.

Figura 9: Veículo Elétrico La Jamais Contente
1899, Velocidade 106 km/h

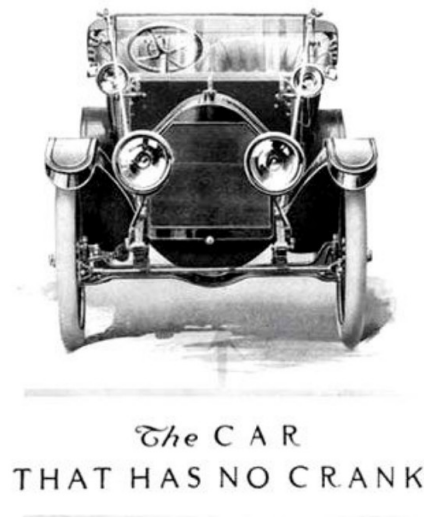


Fonte: Blog Nature

De acordo com a FGV Energia (2016), em 1903, a frota de veículos em Nova York era composta por 53% de veículos a vapor, 27% movidos a combustão interna e 20% por motores elétricos. Apesar dos avanços tecnológicos da época, como o desenvolvimento de baterias de níquel-ferro por Thomas Edison que tinha 40% mais densidade energética que o de chumbo-ácido, o mundo vivia uma era marcada pela recente descoberta do petróleo, que era extremamente abundante. Ao mesmo tempo, a energia elétrica ainda era cara e sua distribuição limitada a poucas regiões, com uma rede não desenvolvida como temos atualmente.

O fim da primeira fase dos veículos elétricos foi marcado pela criação do motor de partida, implementado nos automóveis em 1912 (Figura 10). Essa inovação eliminou a necessidade de girar a manivela para dar partida no motor a combustão, o que antes representava um grande facilitador e diferencial, especialmente para as mulheres. A nova tecnologia rapidamente se difundiu, e já em 1920, a maioria dos automóveis estava equipada com motor de partida.

Figura 10: Cadillac, 1912



Fonte: Noce

Entre 1920 e 1960, os veículos elétricos permaneceram predominantemente restritos a aplicações industriais e locais, como empilhadeiras e sistemas de transporte em bondes e trens. No entanto, a partir das décadas de 1960 e 1970, começaram a surgir discussões mais amplas sobre a pegada ambiental. Outro incidente que ocorreu neste período foi a crise do petróleo de 1973, que impactou significativamente o Ocidente devido ao embargo dos principais produtores de petróleo árabes que fez o preço do petróleo e combustível disparar no mundo. Esse cenário destacou a necessidade de buscar alternativas ao petróleo, impulsionando o interesse por veículos elétricos, como mencionado por Ferreira & Dias (2020)., problemas de poluição ambiental, especialmente devido ao uso de produtos químicos e pesticidas na agricultura, ganharam destaque. Ao mesmo tempo, ocorria um debate sobre a poluição atmosférica nas grandes cidades. Nessa época, o chumbo era utilizado como aditivo na gasolina, e não existiam filtros ou catalisadores para conter as emissões, o que levou as grandes montadoras a voltarem a atenção para os veículos elétricos.

Pouco depois, nos anos 1990, surgiram novas discussões sobre o crescente nível de emissão dos gases de efeito estufa e o aquecimento global. Como resultado, essa década foi marcada por diversos eventos e ações governamentais voltadas à conscientização e à promoção da implantação de veículos elétricos. Ferreira & Dias (2020) destacam alguns exemplos significativos, como a Eco-92, realizada no Rio de Janeiro, que chamou a atenção para os problemas socioambientais causados pelo uso prolongado de combustíveis fósseis. Em 1990, a CARB (California Air Resources Board), órgão do governo do estado da Califórnia, estabeleceu uma cota para veículos com

emissão zero. Essas e outras iniciativas semelhantes ocorreram em diversas partes do mundo, impulsionando a discussão sobre a adoção de veículos elétricos.

Após décadas de discursos ambientais e avanços tecnológicos desde os primeiros modelos de veículos elétricos no início dos anos 1900, a década de 2000 marcou um ponto de virada, com empresas como Toyota, Honda e Audi lançando seus primeiros carros híbridos. Um exemplo notável é o Toyota Prius, lançado em 1997, que alcançou grande sucesso nos Estados Unidos em 2000, consolidando-se como um marco na popularização dos veículos híbridos. Paralelamente, os carros puramente elétricos voltaram a ganhar destaque, principalmente com lançamentos como da Tesla Motors, que produziu modelos capazes de percorrer até 1000 km com uma única carga e de acelerar de 0 a 100 km/h em apenas 1,9 segundos, atingindo uma velocidade máxima de 402 km/h (Figura 11), segundo a própria Tesla.

Figura 11: Tesla Model S 100D



Fonte: Tesla

2.2.2 Baterias

Nos veículos elétricos, o principal componente responsável por fornecer energia para a tração do carro e armazenar energia elétrica é a bateria. De acordo com o PROMOB em “Como Abastecer um Veículo Elétrico?”, a bateria é crucial para determinar a distância que o veículo pode percorrer antes da próxima recarga (autonomia). Além disso, a capacidade da bateria é um dos fatores decisivos no tempo necessário para a recarga completa.

A bateria, de forma simplificada, é composta por dois entes distintos que formam dois polos com polaridades opostas: positivo e negativo. Esses polos são constituídos por diferentes materiais, e são chamados de cátodo e ânodo. Através de uma reação química de oxirredução, é gerada uma diferença de potencial que induz uma corrente elétrica nos terminais da bateria.

A história das baterias começou com Alessandro Volta, que, seguindo os experimentos de Luigi Galvani, criou a Pilha de Volta (Figura 12). Esse nome surgiu porque Volta empilhou várias células para aumentar a tensão nos terminais. Ele descobriu que um fluxo contínuo de elétrons era produzido quando certos fluidos eram utilizados como condutores para promover a reação química entre as placas de metal, conforme escrito por Rodrigues & Ferreira (2014).

Figura 12: Pilha de Volta



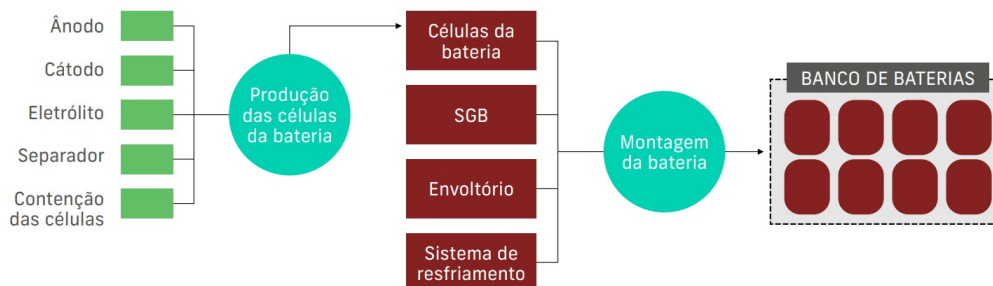
Fonte: Blog Wix

Após a descoberta de Alessandro Volta, muitos outros cientistas continuaram a desenvolver e aprimorar as pilhas, como mencionado por Noce (2009). Entre esses cientistas, destaca-se Dr. William Cruickshank, que em 1802 projetou a primeira bateria de produção em massa. Em 1859, o físico francês Gastón Planté desenvolveu a primeira pilha recarregável. Na década de 1960, surgiram as pilhas alcalinas, seguidas pelas pilhas de chumbo-ácido selada na década de 1970. Em 1990, teve início a comercialização da bateria de Níquel-Metal Hidreto (NiMH), em 1992, a bateria alcalina recarregável, e, finalmente, em 1999, a bateria de Lítio-Íon Polímero foi lançada no mercado.

Na indústria dos veículos elétricos, as baterias mais utilizadas são as de íons de lítio, as de Níquel-metal hidreto e as de chumbo-ácido, porém conforme mencionado no Guia da Eletromobilidade (2022) “As baterias de íons de lítio revolucionaram a indústria de veículos elétricos e se tornaram a composição química com maior representatividade nesse setor, tanto para veículos pesados quanto para leves.”. Onde elas seguem um

padrão de componentes e subcomponentes, que pré estabelecem como é a montagem de uma bateria usado em VE, conforme a Figura 13.

Figura 13: Esquemas dos Componentes e Subcomponentes para Montagem de uma Bateria de Íons de Lítio

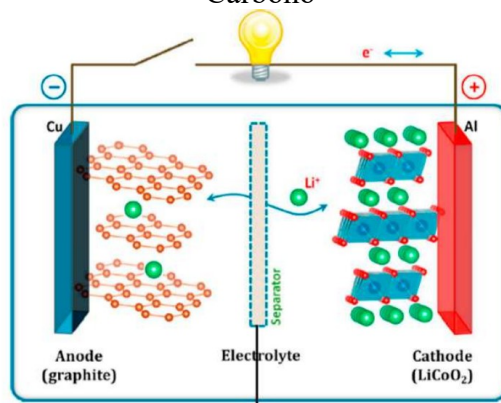


Fonte: Guia Eletromobilidade

As baterias de íons de lítio revolucionaram o mercado ao oferecerem uma alta capacidade de recarga, trazendo inúmeras vantagens tanto para veículos elétricos. Além disso, elas se tornaram a principal escolha em termos de composição química, não apenas pelos benefícios já mencionados, mas também por sua alta densidade de energia e longa vida útil, fatores essenciais para o desempenho eficiente de veículos elétricos.

Existem diferentes tipos de baterias de íons de lítio, e suas principais diferenças estão relacionadas à composição do cátodo, como descrito por CPQD (2022). Essas variações químicas resultam em diferentes nomenclaturas e conferem a cada tipo suas próprias vantagens e desvantagens. Por exemplo, conforme o Guia da Eletromobilidade (2022), as baterias de fosfato de ferro lítio (LFP) são conhecidas por sua segurança e longa vida útil, embora tenham uma densidade de energia (Wh/l) menor. Em contraste, as baterias de óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA) oferecem uma maior densidade de energia, mas tendem a ter uma vida útil mais curta. Porém na questão da reação química todas obedecem ao mesmo padrão como visto na Figura 14.

Figura 14: Baterias de Íons de Lítio com Planos de Carbono



Fonte: CPQD, 2022

As baterias de íons de lítio enfrentam diversos obstáculos, especialmente o elevado custo de produção, que afeta diretamente o preço final dos veículos elétricos. Embora muitos detalhes sobre a estrutura de custos sejam mantidos confidenciais, no Guia da Eletromobilidade (2022) traz que entre 60% e 66% do custo dessas baterias esteja relacionado às matérias-primas, enquanto encargos trabalhistas variam entre 5% e 15%. O restante do custo inclui processos de fabricação, distribuição e margem de lucro dos fabricantes. Esses custos têm uma relação inversa com a expansão do mercado de veículos elétricos. À medida que a tecnologia se torna mais popular e a demanda cresce, a produção em maior escala tende a diminuir o custo por unidade, reduzindo assim o preço dos veículos. O Guia da Eletromobilidade (2022) traz também que desde 2010, os preços das baterias de íons de lítio já caíram 79%, e essa tendência deve continuar nos próximos anos. Além disso, as baterias vêm apresentando um aumento significativo na densidade de energia, melhorando seu desempenho.

Outro aspecto desafiador é a vida útil das baterias, que pode ser avaliada tanto pelo número de ciclos de carga quanto pela durabilidade em anos. O número de ciclos, que representa quantas vezes a bateria pode ser descarregado e recarregado, é influenciado pela composição química e pelo tipo de células utilizadas. A vida útil das baterias é limitada por reações químicas contínuas que ocorrem em seus componentes internos, as quais podem se acelerar em condições adversas, como em temperaturas elevadas segundo o Guia da Eletromobilidade (2022), que também explica o caso de aplicações como em ônibus, por exemplo, considera-se que a bateria atingiu o fim de sua vida útil quando sua capacidade de armazenamento cai abaixo de 80% do valor original e com o uso adequado, essas baterias podem durar de oito a 15 anos. Além disso, o processo de reciclagem das baterias de íons de lítio é particularmente complexo, devido à variedade

de estruturas e composições dos cátodos, adicionando mais uma camada de desafio ao ciclo de vida dessas baterias.

2.2.3 Recarga

O sistema de recarga ou reposição de energia nas baterias dos carros elétricos já possui parâmetros bem definidos. No entanto, esses sistemas também podem ser classificados em diferentes grupos Tabela 2, conforme descrito por Noce (2009).

Tabela 2: Classificação das Recargas de Veículos Elétricos

Classificação dos Tipos de Recarga		
Nível 1	2,3 kW em CA	Residencial
Nível 2	3 - 22 kW em CA	Residencial
Nível 3	3 - 22 kW em CA	Comercial
Nível 4	50 - 100 kW em CC	Carga Rápida

Fonte: Autor

Ao discutir a recarga de veículos elétricos, é essencial considerar o local onde a bateria está sendo carregada, pois diversos fatores podem influenciar a potência de carregamento. A potência pode variar de acordo com a tensão de fornecimento, que pode ser 230 V em sistemas monofásicos ou 380 V e 400 V em sistemas trifásicos. Além disso, a corrente de fornecimento, que pode ser de 10 A, 16 A, 32 A, entre outras, também desempenha um papel importante, segundo PROMOB. Outro fator crucial é o tipo de cabo de alimentação utilizado durante a recarga, que pode impactar a eficiência e a velocidade do processo o que resultou em diferentes tipos de plugues de recarga.

De acordo com Noce (2009), a recarga lenta, ou recarga normal, ocorre quando a taxa de recarga é de 0,1C, ou seja, um décimo da capacidade nominal da bateria. Esse método é geralmente mais econômico, pois utiliza uma potência de carregamento mais baixa. Podemos relacionar o tipo de recarga com o tempo necessário para completar o processo. Esse modelo é comum em residências, onde a potência disponível é, em média, de 3 kW. Considerando que um veículo elétrico possui uma bateria de 25 kWh, o tempo de recarga varia entre 8 e 12 horas.

Figura 15: Recarregador de VE Utilizado em Residências Domésticas



Fonte: PROMOB

Segundo Noce (2009), na recarga rápida, os valores de corrente de recarga são próximos à capacidade de descarga da bateria, ou seja, 1C. No entanto, algumas experiências bem-sucedidas têm alcançado taxas de recarga de até 10C. O fabricante Thundersky (2009) recomenda, em seu manual, uma corrente de recarga rápida de até 3C. Nesse caso, o tempo de recarga para um veículo elétrico geralmente varia entre uma e duas horas. É importante lembrar que o aumento da taxa de recarga C requer uma corrente maior, o que, por sua vez, demanda cabos com maior seção e maior potência no ponto de carregamento, muitas vezes incompatíveis com a infraestrutura residencial. A recarga rápida costuma levar de 1 a 2 horas com potências entre 7,2 kW e 22 kW, e pode ser reduzida para cerca de 30 minutos quando a potência se aproxima de 50 kW.

Figura 16: Estação de Recarga Rápida



Fonte: PROMOB

2.2.4 Regulamentação

Assim como ocorre com qualquer meio de transporte, os veículos elétricos estão sujeitos a diversas regulamentações e normas que cobrem diferentes aspectos de sua operação. Um exemplo relevante é a Resolução Normativa N° 819, de 19 de junho de 2018, que estabelece os procedimentos e condições para a recarga de veículos elétricos, definindo como concessionárias e permissionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica devem realizar essa atividade. Essas normas garantem a segurança, qualidade e acessibilidade no processo de abastecimento, abordando também a instalação de estações de recarga, padronização de conectores e cabos, e tarifação dos serviços de recarga. Conforme mencionado pelo PROMOB, essas regulamentações são fundamentais para integrar de forma eficiente e sustentável os veículos elétricos à infraestrutura elétrica existente.

Conforme apontado por Oliveira (2023), as regulamentações não apenas incentivam o uso de veículos elétricos, mas também impulsionam o desenvolvimento da infraestrutura e das tecnologias associadas. Essas normas permitem direcionar o progresso da eletromobilidade, garantindo que as soluções sejam flexíveis e atendam às necessidades de todos os consumidores. Isso abrange desde a padronização de equipamentos até a definição de protocolos de comunicação, assegurando a interoperabilidade de todo o ecossistema. Além disso, Oliveira (2023) destaca que as

regulamentações e normas serão fundamentadas em três pilares principais: meio ambiente, infraestrutura e mercado, cada um deles essencial para moldar e fortalecer o setor de mobilidade elétrica.

Segundo uma pesquisa realizada pelo PNME (2022), que mapeou 24 iniciativas legislativas relacionadas à mobilidade elétrica, 64% dessas iniciativas têm alcance federal, 20% são de caráter municipal e 16% são de âmbito estadual. Essas iniciativas são focadas em fomentar novas propostas e direcionar estratégias de políticas públicas, abrangendo diferentes níveis governamentais para promover a adoção de tecnologias de mobilidade elétrica no Brasil.

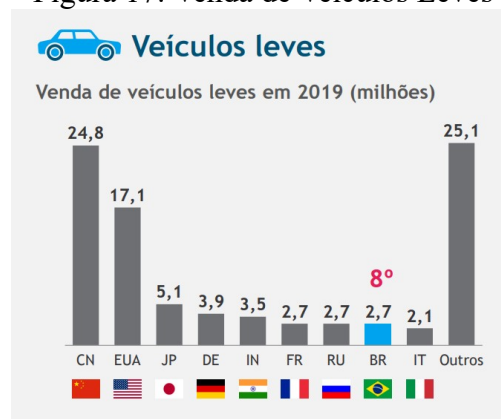
No âmbito do governo federal, diversos atores estão envolvidos em iniciativas que direta ou indiretamente impactam o ecossistema da eletromobilidade no Brasil, conforme apontado pelo ICCT em seu relatório "Brazil Electromobility" (2018). O Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), por exemplo, promove discussões sobre eletromobilidade dentro da política industrial automotiva, conhecida como Rota 2030. Já o Ministério do Meio Ambiente (MMA) atua na formulação de políticas que fortalecem a gestão da qualidade do ar, um fator crucial para a adoção de veículos elétricos, contribuindo indiretamente para o avanço da eletromobilidade. O Ministério de Minas e Energia (MME) também desempenha um papel importante ao mapear e modelar a qualidade do ar, fornecendo dados para a criação de políticas públicas relacionadas à qualidade dos combustíveis, saúde pública e mobilidade urbana. Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) lançou consultas públicas em 2016 e 2017 para avaliar os impactos dos veículos elétricos na estrutura tarifária e no sistema elétrico.

Além das regulamentações e normas que impulsionam iniciativas voltadas para a eletromobilidade, também existem diretrizes específicas para a instalação de postos de recarga de veículos elétricos. Experiências internacionais mostram que a infraestrutura de carregamento é fundamental para o sucesso da mobilidade elétrica. Para expandir essa infraestrutura, é necessário desenvolver tanto estações de carga em espaços públicos quanto privados, contemplando opções de recarga lenta e rápida. No Brasil, apesar de os avanços ainda serem tímidos, já foram dados os primeiros passos, como a implementação de projetos-piloto, o desenvolvimento de legislações que estabelecem modelos de negócios, discussões técnicas e esforços de padronização. Essas iniciativas iniciais são essenciais para criar um ambiente favorável ao crescimento da eletromobilidade no país.

2.2.5 Atualidade no Brasil

Atualmente, o Brasil se destaca como um dos maiores mercados automotivos do mundo, especialmente na compra de veículos leves. Com o aumento da conscientização sobre questões ambientais, o setor de mobilidade elétrica tem mostrado grande potencial e viabilidade no país. Esse cenário está levando um número crescente de consumidores a considerar o investimento em veículos elétricos, avaliando se essa tecnologia é uma escolha sensata e como realizar a transição para ela de maneira eficaz.

Figura 17: Venda de Veículos Leves



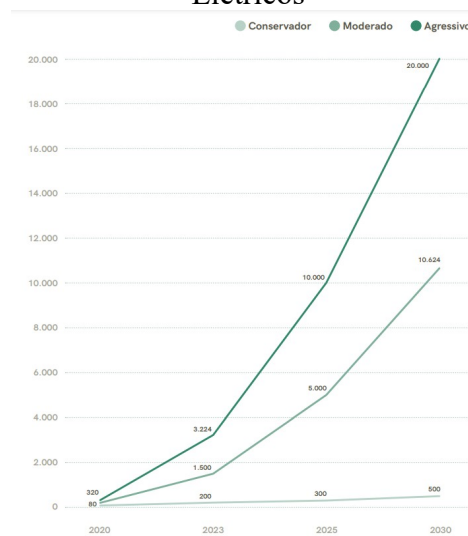
Fonte: ANFAVEA

Oliveira (2023) levanta questões importantes sobre a viabilidade e a implantação de veículos elétricos no Brasil, considerando os desafios e oportunidades nesse processo. Ele destaca a ampla gama de impostos, taxas de importação e subsídios aplicados a veículos, combustíveis, eletricidade e serviços, questionando até que ponto esses fatores distorcem as escolhas dos consumidores entre veículos elétricos e os movidos por motores de combustão interna. Embora os veículos elétricos sejam socialmente desejáveis, especialmente em relação aos Objetivos de desenvolvimento sustentável, Oliveira questiona se essa tecnologia pode se tornar financeiramente atraente no Brasil sem o apoio de incentivos, políticas públicas e regulamentações promovidas por entidades governamentais. Isso sugere que, além das vantagens ambientais, a adoção dos VE no Brasil depende também de um ambiente regulatório favorável que equilibre os custos e benefícios econômicos para os consumidores.

Historicamente, os veículos elétricos têm sido propostos como uma alternativa viável aos carros convencionais, abordando questões como a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa. No entanto, sua adoção em massa enfrenta desafios significativos, especialmente o alto custo em comparação

com outras opções no mercado automotivo. Em países como Portugal, por exemplo, a compra de um veículo elétrico ainda não é financeiramente vantajosa nas condições atuais, sem incentivos ou tarifas especiais de eletricidade, e a estrutura tributária desfavorece esses veículos Ferreira & Dias (2020). No curto prazo, o argumento de custo não é convincente, mas a longo prazo, os veículos elétricos tornam-se mais atraentes devido aos menores custos de operação e manutenção, além de sua maior durabilidade. Isso faz com que, apesar dos altos custos iniciais, os benefícios econômicos ao longo do tempo justifiquem o investimento, tornando-os uma opção mais econômica e sustentável no futuro.

Figura 18: Progressão da Frota de Veículos Elétricos



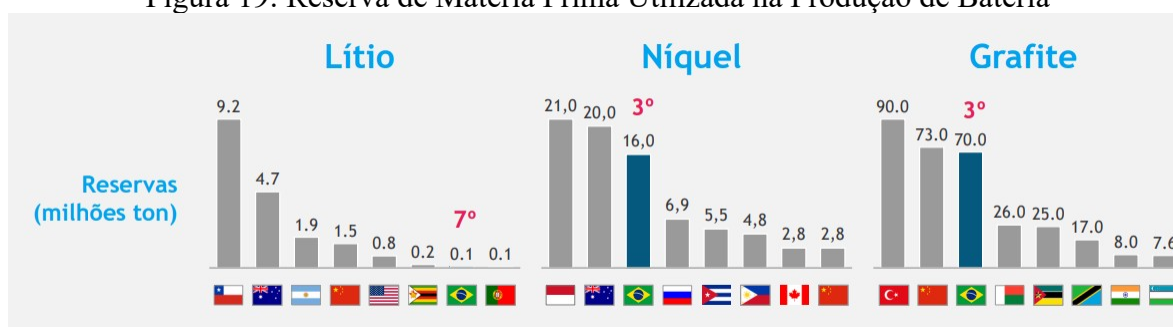
Fonte: PNME

À medida que os veículos elétricos se mostram cada vez mais vantajosos a longo prazo, o interesse por essa tecnologia tem crescido consideravelmente. A imagem acima oferece uma perspectiva do futuro do mercado de veículos elétricos no Brasil, conforme apresentado pelo PNME (2020). Ela exhibe três curvas distintas que representam diferentes cenários de crescimento da frota de veículos elétricos no país. Apesar das variações nas previsões, é evidente que o crescimento do mercado de veículos elétricos é uma tendência inevitável. Esse aumento já pode ser observado de maneira prática, com a presença crescente desses veículos nas ruas, refletindo uma transição gradual para soluções de mobilidade mais sustentáveis.

Assim como discutido no tópico de regulamentação, o Brasil tem investido significativamente em políticas e normas para promover o uso de veículos elétricos e ampliar sua presença no mercado. No entanto, além desses esforços regulatórios, o país

possui uma vantagem estratégica que ainda não é plenamente explorada: suas vastas reservas de minerais essenciais para a fabricação de veículos elétricos, como o grafite e o níquel. Essas reservas poderiam posicionar o Brasil impulsionando ainda mais a adoção dessa tecnologia. Apesar desse potencial, o aproveitamento desses recursos ainda é limitado, o que impede o país de maximizar os benefícios econômicos e tecnológicos que poderiam surgir de uma maior integração entre suas reservas minerais e o crescimento do mercado de veículos elétricos.

Figura 19: Reserva de Matéria Prima Utilizada na Produção de Bateria



Fonte: ANFAVEA

2.3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Nos Estados Unidos, a partir de uma série de análises sobre as especificações de um equipamento eletrônico em relação à sua capacidade de operar sob perturbações no fornecimento de energia, surgiu a primeira discussão sobre o conceito de qualidade da energia elétrica (QEE), conforme (Queirós, 2022).

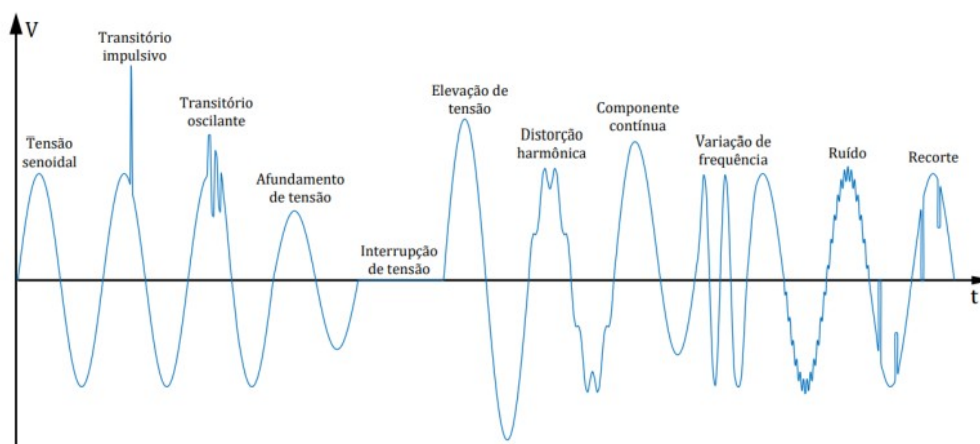
Em (Borges, 2019) o crescimento contínuo da demanda nacional por energia elétrica, somado à dificuldade de construir grandes empreendimentos de geração, tem impulsionado a inclusão da geração distribuída (GD) fotovoltaica. Esse incentivo é promovido por razões financeiras, ambientais, sociais e técnicas, se destacando em relação a outros tipos de geração. Para garantir a qualidade da energia elétrica (QEE) na rede, os sistemas precisam fornecer energia seguindo padrões mínimos, sendo essencial uma análise cuidadosa dos impactos técnicos na rede elétrica.

A qualidade da energia elétrica se refere à conformidade das formas de onda de tensão e corrente no sistema elétrico. Variações nessas formas de onda ocorrem devido a fenômenos eletromagnéticos, podendo ser classificadas como transitórias, variações de curta e longa duração, de frequência ou distorções. No passado, a QEE estava associada

à continuidade do serviço, mas hoje engloba também outras alterações que podem afetar o desempenho do sistema, (Borges,2019).

Desta forma a Figura 20 traz as diferentes classificações que temos para diferentes tipos de oscilação que são características de uma baixa qualidade de energia.

Figura 20: Oscilograma com alguns dos principais distúrbios de QEE



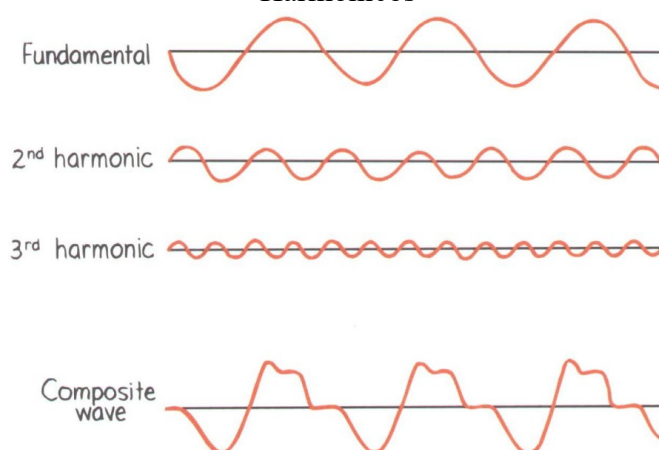
Fonte: BORGES, 2019

2.3.1 Distorção Harmônica

As harmônicas são distorções nas formas de onda de tensão ou corrente que ocorrem quando múltiplos de uma frequência fundamental se manifestam em um sistema elétrico. Elas surgem, principalmente, devido à presença de cargas não lineares, como equipamentos eletrônicos, inversores e motores. Essas distorções afetam negativamente a qualidade da energia elétrica, podendo provocar aquecimento excessivo de componentes, perdas de eficiência e mau funcionamento de equipamentos.

Em (Borges,2019) traz que os harmônicos são descrições matemáticas de uma forma de onda distorcida, a Transformada de Fourier permite substituir essa onda distorcida por uma soma de ondas senoidais puras, cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Oscilograma com Componente Fundamental e Harmônicos



Fonte: PAVAN, 2020

De acordo com (Borges, 2019), as distorções harmônicas se tornam mais acentuadas quando o inversor opera abaixo de 20% de sua capacidade nominal. Isso acontece porque as estratégias de controle da maioria dos inversores não conseguem ajustar um ponto de operação eficiente para gerar uma onda senoidal na saída. Vale ressaltar também que os harmônicos de terceira ordem, assim como seus múltiplos ímpares, não estão presentes em sistemas trifásicos alimentados por três fios. Isso ocorre porque, como são harmônicos de sequência zero, não há um caminho de retorno pelo condutor neutro. Na Tabela 3, é ilustrado o caso do Brasil, que possui uma frequência fundamental de 60 Hz.

Tabela 3: Sequência de fase por ordem harmônica

Ordem (H)	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	11 ^a	12 ^a
Freq. (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	520	580	640	700
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: BORGES, 2019

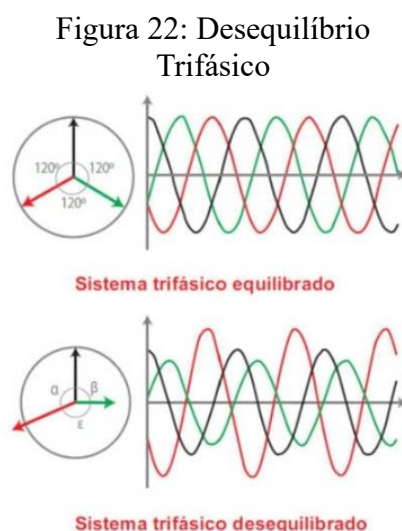
Para assegurar a operação adequada do sistema elétrico e das instalações, é necessário seguir níveis específicos para o cálculo dos indicadores de distorção harmônica. Instituições internacionais, como a IEC (International Electrotechnical Commission) e o IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), definem os limites máximos de harmônicos. A norma IEC 61000-3-2 trata de limites para cargas de até 16 A em baixa tensão, enquanto a IEC 61000-3-4 abrange dispositivos que utilizam mais de 16 A. A norma IEEE 519-2014, por sua vez, regula os níveis de harmônicos no ponto de

conexão entre a rede e a indústria, focando nos níveis que a rede elétrica pode suportar (IEC 61000-3-2, 2018; IEC 61000-3-4, 1998; IEEE 519-2014, 2014).

No Brasil, os limites para harmônicos são regulamentados pelo PRODIST modulo 8, que define as metodologias e instrumentos de medição, bem como os valores de referência para a distorção harmônica de tensão. Com o objetivo de quantificar os níveis de interferência harmônica nos pontos de conexão com a rede, foram criados indicadores de distorção harmônica, (Borges, 2019). No entanto, a resolução vigente não define limites para harmônicos de corrente. Com o objetivo de possibilitar a quantificação dos níveis de interferência harmônica em um ponto de acoplamento à rede, de acordo com as regulamentações, foram desenvolvidos indicadores de distorção harmônica.

2.3.2 Desequilíbrio

As tensões trifásicas ideais são compostas por tensões de mesmo módulo, defasadas em 120° entre si. No entanto, em condições reais, devido a diversos fatores como resistência dos cabos, indução de corrente, entre outros, essas tensões acabam não sendo perfeitamente equilibradas, resultando em desequilíbrios. Para garantir uma boa qualidade de energia, foram estabelecidos normas e diretrizes que definem limites aceitáveis para esse desequilíbrio, assegurando que ele não comprometa o desempenho dos sistemas elétricos, podemos entender este desequilíbrio melhor na Figura 22.



Fonte: Blog MECFI

Por (Borges, 2019), traz que o desequilíbrio de tensão em uma rede representa um problema sério para a qualidade da energia elétrica, pois pode comprometer

significativamente o funcionamento dos equipamentos conectados. Esse tipo de desequilíbrio afeta, sobretudo, os sistemas de distribuição de baixa tensão. A causa principal desse fenômeno é a distribuição assimétrica de cargas monofásicas, que resulta em correntes e tensões desequilibradas. Dessa forma, um estudo detalhado da distribuição de cargas, considerando as variações nos chaveamentos ao longo do dia e as futuras expansões de carga, é essencial para reduzir esse problema.

No contexto atual, a micro geração distribuída enfrenta desafios técnicos no que se refere ao equilíbrio de tensão entre fases. O uso de sistemas monofásicos é comum nesse tipo de geração, sendo necessário garantir que a fase de conexão da geração distribuída (GD) permaneça dentro dos limites de tensão adequados, evitando ultrapassar os níveis aceitáveis de desequilíbrio (Borges, 2019).

Normas internacionais, como a EN-50160 e a IEC 61000-3, estabelecem limites de desequilíbrio de tensão de 1% para sistemas de alta-tensão e 2% para sistemas de baixa tensão. No Brasil, a norma vigente, presente no PRODIST módulo 8, define que o valor de referência nos barramentos dos sistemas de distribuição, exceto os de baixa tensão, deve ser de no máximo 2%, enquanto para sistemas de baixa tensão o limite é de 3%. A Tabela 4 apresenta os limites de desequilíbrio de tensão.

Tabela 4: Limites para Desequilíbrio de Tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1\text{ kV}$	$1\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$
FD95%	3,00%	2,00%

Fonte: BORGES, 2019

2.3.3 Fator de Potência/ Reativo

O Fator de Potência (FP) é a relação entre a potência ativa (P), que é a potência que realiza trabalho útil em um sistema e é medida em quilowatts (kW); e a potência aparente (S), que é a combinação da potência ativa com a potência reativa (Q), esta última sendo responsável por manter o campo magnético necessário para o funcionamento de dispositivos como motores e transformadores, sendo medida em quilovolt-ampère reativo (kVAr). O fator de potência indica a eficiência com que a energia elétrica é utilizada e um bom indicador de qualidade de energia. Quanto mais próximo de 1 for o fator de potência, mais eficiente é o uso da energia. Um fator de potência baixo significa que há uma maior quantidade de potência reativa, o que pode sobrecarregar o

sistema elétrico sem gerar trabalho útil, conforme a Tabela 5 podemos classificar os diferentes tipos de FP.

Tabela 5: Tipos de Fator de Potência

Fator de Potência	Classificação
FP = 1	Toda a energia fornecida é utilizada em trabalho útil.
FP < 1, CAPACITIVO	Em um sistema capacitivo, a corrente “antecipa” a tensão (adianta-se)
FP < 1, INDUTIVO	No caso de uma carga indutiva a corrente “atrasa” em relação à tensão

Fonte: Autor

Os sistemas fotovoltaicos, em sua maioria, operam com um fator de potência unitário, ou seja, próximo de 1. Isso ocorre porque os padrões atuais, como a norma IEEE 929-2000, estabelecem que os conversores de potência desses sistemas não podem operar em modo de regulação de tensão. Dessa forma, eles fornecem apenas potência ativa para atender as cargas, sem contribuir com a compensação da potência reativa. Esse cenário transfere a responsabilidade pela compensação da potência reativa para as concessionárias de energia, que precisam ajustar suas operações para manter o equilíbrio e a eficiência da rede elétrica como traz (Queirós, 2022).

A presença de harmônicos agrava o desafio de corrigir o fator de potência, pois esses componentes de frequência distorcem a forma de onda da corrente, resultando em uma menor eficiência na utilização da energia elétrica e dificultando a correção do fator de potência. Isso pode fazer com que os capacitores adicionados para compensação não sejam mais suficientes para corrigir o fator de potência de maneira eficaz, dado que eles interagem com os harmônicos presentes. Como resultado, a correção tradicional do fator de potência pode não ser suficiente, e a instalação de equipamentos mais avançados, como filtros de harmônicos, pode ser necessária para manter a qualidade da energia em níveis aceitáveis, além de reduzir a sobrecarga em transformadores e outros dispositivos do sistema elétrico assim como traz (NETO, 2023).

As normas de qualidade de energia elétrica no Brasil, especialmente no que diz respeito ao FP e à energia reativa, são regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. De acordo com essas normas, o fator de potência mínimo exigido para unidades consumidoras é de 0,92. Caso o fator de potência fique abaixo desse valor, a concessionária pode cobrar tarifas adicionais pela energia reativa excedente. A correção

do fator de potência é essencial para melhorar a eficiência energética, reduzir perdas e evitar penalidades financeiras.

2.3.4 Demanda

A contratação adequada da demanda impacta diretamente dois aspectos fundamentais: o financeiro e a prevenção de sobrecargas. Do ponto de vista financeiro, uma demanda mal dimensionada pode gerar custos desnecessários. Já no aspecto técnico, uma demanda incorreta pode resultar em exemplos como sobreaquecimento, sobrecorrente e quedas de tensão.

Além disso, uma demanda subdimensionada pode levar a multas por ultrapassagem de demanda contratada, aumentando os custos operacionais da empresa. A distribuidora de energia elétrica aplica essas multas como uma forma de compensar o consumo além do que foi inicialmente acordado, o que sobrecarrega o sistema de distribuição e pode impactar a qualidade do fornecimento. Portanto, é essencial que o dimensionamento da demanda seja feito com base em estudos detalhados de consumo, considerando as variações sazonais e o perfil de carga das instalações (ALMEIDA et al., 2020).

Por outro lado, uma demanda superdimensionada também pode gerar custos desnecessários, já que o consumidor pagará por uma reserva de energia que não será utilizada plenamente. O correto equilíbrio entre a demanda contratada e a real necessidade da instalação garante não apenas a redução de custos, mas também a eficiência energética. Segundo Oliveira e Santos (2021), a otimização do contrato de demanda pode resultar em economias significativas ao longo do tempo, além de minimizar os riscos de problemas técnicos, como o sobreaquecimento de equipamentos e a degradação dos componentes elétricos.

Assim, podemos concluir que existem diversas normas que estabelecem parâmetros de qualidade de energia para a rede elétrica, abrangendo questões como harmônicos, sobretensões, variações de tensão, entre outros. No caso específico dos sistemas carport conectados à rede — que são o foco deste trabalho —, a energia gerada pelos painéis solares, quando não está sendo utilizada para carregar veículos elétricos, é injetada na rede elétrica. Portanto, esses sistemas conjugados devem seguir rigorosamente os parâmetros de qualidade de energia estabelecidos para sistemas

fotovoltaicos, garantindo que a energia injetada atenda aos padrões exigidos para manter a eficiência e a estabilidade do sistema elétrico.

3. RECURSOS

Essa parte faz referência aos equipamentos utilizados para realizar a análise técnica dos sistemas conjugados, tanto nos testes realizados em laboratório quanto nas avaliações feitas em campo.

3.1 SIMULADOR DE GERADOR FOTOVOLTAICO

O simulador de gerador fotovoltaico, como o próprio nome sugere, tem a função de emular o comportamento de painéis fotovoltaicos, gerando tensões e correntes, além de reproduzir a curva de Ponto de Máxima Potência (MPPT). De acordo com a norma (Toledo e Coube, 2021) o simulador deve ser capaz de replicar com precisão as características da relação corrente versus tensão, bem como o tempo de resposta de um gerador fotovoltaico real. Além disso, o equipamento deve permitir que o ripple gerado pelo inversor no lado de corrente contínua (CC) seja mantido, principalmente quando o algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência (SPMP) está em uso. O simulador utilizado neste trabalho foi o KEYSIGHT N8937APV, conforme ilustrado na Figura 23. Este equipamento possui as seguintes especificações: faixa de operação de 0 a 1500V e 0 a 30A, com uma potência nominal de até 15.000W.

Figura 23: KEYSIGHT N8937APV



Fonte: KEYSIGHT

O analisador de qualidade de energia é um dispositivo indispensável para monitorar e avaliar a eficiência do uso da energia elétrica em instalações comerciais e industriais. Ele realiza medições de parâmetros essenciais como tensão, corrente, frequência e harmônicos, auxiliando na identificação de problemas que podem comprometer o desempenho dos equipamentos e a segurança das instalações. Com a

capacidade de detectar variações e interrupções sutis, o analisador de qualidade de energia é crucial para analisar falhas que possam ocorrer.

3.2 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA

O analisador utilizado para a captura dos dados foi o AIW-01-PEM Class A, conforme ilustrado na Figura 24. Este dispositivo foi desenvolvido pela SIGMASYS Engenharia para atender aos requisitos de medição Classe A, conforme estabelecido pela norma internacional IEC 61000-4-30.

Figura 24: AIW-01-PEM Class A



Fonte: SIGMASYS Engenharia

3.3 INVERSOR FOTOVOLTAICO

O inversor fotovoltaico, como mencionado anteriormente, é responsável por conectar a energia gerada em corrente contínua pelos painéis solares – ou, no caso do laboratório, pelo simulador de gerador fotovoltaico – à rede elétrica, que opera em corrente alternada. Sua função é essencial nessa integração, pois é o inversor que, por meio do chaveamento de IGBTs (transistores bipolares de porta isolada), converte a corrente contínua em corrente alternada, permitindo a sincronização com a rede elétrica.

O inversor utilizado neste trabalho é o modelo SIW500H ST036 M3 da WEG, conforme ilustrado na Figura 25. Esse modelo apresenta uma ampla gama de especificações, como potência máxima de entrada de 54 kW, tensão máxima de entrada a

1,1 kV e potência ativa máxima de saída de 40 kW, com uma corrente de saída máxima de 61,1 A. Detalhes adicionais sobre as especificações do inversor podem ser consultados no Anexo A.

Figura 25: SIW500H M3



Fonte: WEG

3.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema carport instalado no LACTEC, especificamente na unidade LAC, que serve como local de estudo, possui uma potência de geração de 29,37 kWp, distribuída em 3 strings, cada uma composta por 22 placas de 445 Wp. As placas solares, modelo RSM156-6-445M da fabricante RISEN, operam com uma corrente de MPP de 10,15 A e uma tensão de MPP de 43,9 V. A estrutura de suporte, feita de aço, além de segurar as placas, também funciona como cobertura para o veículo em recarga. Essa estrutura está conectada aos módulos solares e possui duas descidas de aterramento, interligadas à malha de aterramento do sistema, apresentando uma resistência de 1,5 Ω , conforme medição realizada. A Figura 26 ilustra o carport utilizado no estudo.

Figura 26: CARPORT LAC



Fonte: Autor

3.5 CARREGADOR SEMIRRÁPIDO

O carregador semirrápido presente no sistema é o modelo WEMOB-P-046-W-E-3G-R-HMI-2T2 da WEG, que oferece uma potência de saída de 22 kW por plugue. Como mostrado na Figura 27, o posto de abastecimento está equipado com dois plugues, totalizando uma potência de 44 kW. Cada plugue pode fornecer uma corrente máxima de 35 A, com uma tensão nominal que varia entre 198 e 415 V, operando em um sistema trifásico com frequência de 50/60 Hz. Este modelo de estação de recarga possui plug doo CA do tipo 2.

Figura 27: Estação Semirrápida WEG



Fonte: Autor

3.6 CARREGADOR RÁPIDO

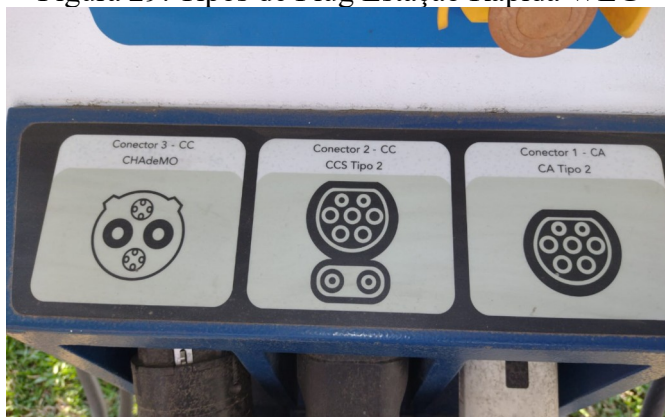
As estações de carregamento rápido também são da WEG, porém o modelo utilizado é o WEMOB-S-060-W-E-4G-R-H-1T2 como mostra a Figura 28. Esse carregador conta com três plugues: um CCS-2, um CHAdeMO (ambos em corrente contínua), e um Type 2 (em corrente alternada) conforme Figura 29. As saídas de corrente contínua têm uma potência de 60 kW, enquanto o plugue de corrente alternada (CA) oferece uma potência de até 44 kW. Esse sistema permite uma ampla flexibilidade para diferentes tipos de veículos elétricos.

Figura 28: Estação Rápida WEG



Fonte: Autor

Figura 29: Tipos de Plug Estação Rápida WEG



Fonte: Autor

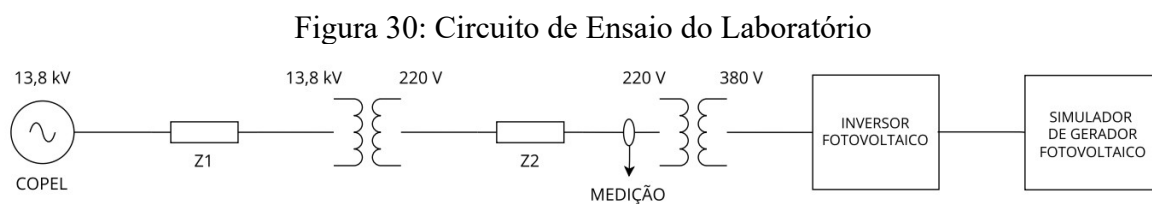
4. RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os ensaios realizados, detalhando o croqui utilizado, os parâmetros definidos para a captura dos dados, e a posterior análise, bem como os resultados obtidos em si. A estrutura busca fornecer uma visão clara e organizada do processo, desde a preparação dos experimentos até a interpretação dos resultados alcançados.

4.1 LABORATÓRIO

4.1.1 Circuito de Medição

O circuito utilizado na medição em laboratório foi realizado conforme mostra a Figura 30 abaixo.



Fonte: Autor

4.1.2 Parâmetros

No laboratório, após a correta ligação de todos os equipamentos conforme o circuito apresentado no item 4.2.1, foi realizada a configuração do simulador de gerador fotovoltaico, responsável por simular os painéis solares e fornecer a tensão em corrente contínua (CC).

As configurações de saída do gerador fotovoltaico foram realizadas por meio do software Keysight SAS Control instalado em um computador presente no laboratório, que servia de interface entre o simulador e o usuário. Através do computador, era possível monitorar em tempo real o comportamento do algoritmo, garantindo que o inversor operasse o mais próximo possível do ponto de máxima potência (MPPT), com base no gráfico gerado a partir das especificações fornecidas ao gerador CC, assim o simulador

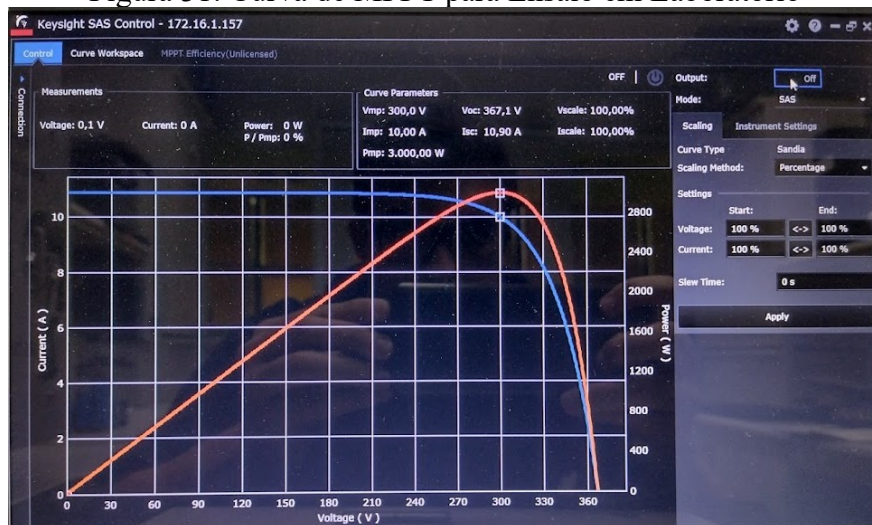
foi configurado com os seguintes parâmetros mostrados na Tabela 6 e sua curva ficou com a seguinte curva característica mostrada na Figura 31.

Tabela 6: Parâmetros do Simulador

Parametros da Curva	
Tensão de Circuito Aberto	367,1 V
Corrente de Curto Circuito	10,9 A
Tensão de Máxima Potência	300 V
Corrente de Máxima Potência	10 A
Potência de Máxima Potência	3000 W

Fonte: Autor

Figura 31: Curva de MPPT para Ensaio em Laboratório



Fonte: Autor

O inversor utilizado apresenta na entrada um intervalo de operação do MPPT entre 200 e 1000 V, portanto o valor de 300 V utilizado na simulação está dentro desse limite. A corrente definida para a simulação é de 10 A, estando também dentro da capacidade do inversor, que suporta até 13 A pôr circuito de MPPT (Maximum Power Point Tracking). Além disso, a potência empregada na simulação é de 3 kW, o que se encontra bem abaixo da capacidade máxima do inversor, que pode operar com até 36 kW.

A saída do inversor opera a 380 V com frequência de 50 ou 60 Hz e uma potência nominal de 36 kW. Para garantir o correto pareamento com a rede elétrica, foi instalado um transformador de 220/380 V, uma vez que a rede local opera a 220 V e 60 Hz, assegurando assim a conexão adequada entre os componentes. A Figura 30 ilustra de forma clara o circuito e seus respectivos valores. Vale ressaltar que a potência utilizada nos ensaios de laboratório é significativamente menor do que a aplicada em campo por utilizar apenas uma string do inversor com uma potência de 3 kW. Apesar de a montagem

reproduzir o sistema real, a potência envolvida nos testes está consideravelmente reduzida, o que sugere que essa diferença não deverá impactar significativamente os resultados experimentais.

4.1.3 Resultados

As medições realizadas em laboratório foram conduzidas para simular dois cenários distintos, denominados Caso A e Caso B.

No Caso A, o inversor foi operado em vazio, ou seja, estava ligado e conectado à rede elétrica, porém sem estar acoplado ao gerador fotovoltaico que simula os módulos solares utilizados no modelo de campo. Os dados foram coletados por meio de um analisador de qualidade de energia, consistindo em medições instantâneas, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 a seguir.

Tabela 7: Dados Analisar de Qualidade Energia Caso A
Parte 1(Laboratório)

CASO A			
PONTOS ANALISADOS	FASE A	FASE B	FASE C
CORRENTE	0,563 A	0,422 A	0,519 A
FATOR DE POTÊNCIA	0,987 IND	-0,865 CAP	0,992 IND
FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	0,083 PU	0,071 PU	0,063 PU
HARMÔNICA DE CORRENTE	86,348%	130,502%	97,676%
HARMÔNICA DE TENSÃO	2,111%	2,306%	2,021%
POTÊNCIA APARENTE	0,071 KVA	0,056 KVA	0,063 KVA
POTÊNCIA ATIVA	0,053 KW	0,028 KW	0,046 KW
POTÊNCIA REATIVA	0,013 KVAR	-0,017 KVAR	0,000 KVAR
TENSÃO F-F	223,292 V	223,452 V	222,590 V
TENSÃO F-N	128,586 V	128,988 V	128,632 V

Fonte: Autor

Tabela 8: Dados Analisar de
Qualidade Energia Caso A Parte
2(Laboratório)

CASO A	
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	0,206%
FREQUÊNCIA	60,005 HZ
POTÊNCIA TOTAL APARENTE	0,128 KVA
POTÊNCIA TOTAL REATIVA	-0,003 KVAR
POTÊNCIA TOTAL ATIVA	0,128 KW

Fonte: Autor

No Caso A, o inversor foi operado em vazio, ou seja, estava conectado à rede elétrica sem estar acoplado ao gerador fotovoltaico. Nessa condição, observamos um fator de potência (FP) baixo, especialmente na fase B, onde a carga apresenta características predominantemente capacitivas. Esse comportamento ocorre quando o inversor está em modo de standby, consumindo apenas a energia mínima necessária para se manter em operação, como evidenciado pelo baixo consumo de corrente. A presença de potência reativa negativa e a predominância de características capacitivas indicam que o sistema está injetando potência reativa capacitiva na rede, algo comum em inversores que compensam reativos para corrigir a fase de corrente e melhorar a eficiência quando não estão fornecendo potência ativa significativa.

A análise das distorções harmônicas de corrente revelou valores elevados, característica comum em situações em que o inversor opera sem carga, o que pode ser atribuído à ausência de estabilização. Contudo, apesar da alta distorção harmônica de corrente observada quando o inversor não está injetando corrente, tal condição não apresenta impacto significativo, uma vez que a demanda de potência é bastante reduzida. Por outro lado, o desequilíbrio de tensão manteve-se dentro dos limites aceitáveis conforme estabelecido pela norma discutida no tópico 2.3.2.

Com base nos resultados obtidos para a análise harmônica de tensão, é possível observar que os valores medidos estão dentro dos limites estabelecidos de Indicadores de Distorção Harmônica Total (DTT) para sistemas com tensão nominal de até 1 kV, já que a medição em laboratório mostrou uma DTT máxima de 2,306% para a fase B enquanto o limite máximo permitido é de 10%. Conforme traz (Borges, 2019) e simplificado na Tabela 9.

Tabela 9: Tabela com Distorções Harmônicas Totais

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1\text{ kV}$	$1\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} \leq V_n < 69\text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT(3) _{95%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Borges, 2019

Em relação à flutuação de tensão, os valores registrados estão dentro dos padrões estabelecidos para limites de flutuação de tensão, de acordo com a tensão nominal do sistema, pois como traz (Borges, 2019) o limite para tensões nominais abaixo de 1kV é de

1,0 PU como representado melhor na Tabela 10, e a leitura foi no máximo 0,083 PU na Fase A.

Tabela 10: Limites para Flutuação de Tensão

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: Borges, 2019

No Caso B, as medições foram realizadas utilizando o gerador fotovoltaico, configurado conforme descrito no item 4.2.2. Assim como no caso anterior, os dados foram coletados de forma instantânea por meio do analisador de qualidade de energia, e seus resultados estão apresentados nas Tabelas 11 e 12 a seguir.

Tabela 11: Dados Analisar de Qualidade Energia Caso B Parte 1(Laboratório)

CASO B			
PONTOS ANALISADOS	FASE A	FASE B	FASE C
CORRENTE	7,056 A	7,119 A	7,137 A
FATOR DE POTÊNCIA	0,999 IND	0,998 IND	0,998 IND
FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	0,002 PU	0,002 PU	0,001 PU
HARMÔNICA DE CORRENTE	10,001%	9,731%	11,602%
HARMÔNICA DE TENSÃO	2,149%	2,336%	2,073%
POTÊNCIA APARENTE	0,916 KVA	0,932 KVA	0,927 KVA
POTÊNCIA ATIVA	-0,905 KW	-0,917 KW	-0,914 KW
POTÊNCIA REATIVA	0,050 KVAR	0,051 KVAR	0,065 KVAR
TENSÃO F-F	224,184 V	224,328 V	223,444 V
TENSÃO F-N	129,145 V	129,712 V	129,249 V

Fonte: Autor

Tabela 12: Dados Analisar de Qualidade Energia
Caso B Parte 2(Laboratório)

CASO B	
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	0,152%
FREQUÊNCIA	60,034 HZ
POTÊNCIA TOTAL APARENTE	2,741 KVA
POTÊNCIA TOTAL REATIVA	0,165 KVAR
POTÊNCIA TOTAL ATIVA	-2736 KW

Fonte: Autor

No Caso B, com o gerador fotovoltaico em operação, o inversor atua injetando energia na rede, ainda que em baixa potência, correspondente a aproximadamente 10% de sua capacidade nominal, conforme descrito no tópico 4.2.2. Nessa condição, observou-se uma melhora significativa na distorção harmônica de corrente, uma vez que, ao operar sob carga, o inversor consegue otimizar seu desempenho, reduzindo as oscilações harmônicas associadas ao seu funcionamento em vazio. A injeção de potência ativa, mesmo que em baixa intensidade, contribui para estabilizar as correntes e minimizar as componentes harmônicas, evidenciando a eficiência do inversor quando operado dentro de sua faixa de operação ativa. No entanto, é importante destacar que, devido à baixa utilização da capacidade nominal do inversor, os níveis de distorção harmônica (THD) ainda não são apropriados. Outro aspecto relevante a ser mencionado é a ocorrência de potência ativa negativa, uma vez que, nesse cenário, a energia está sendo injetada na rede, resultando em um fluxo de potência contrário ao fluxo convencional.

Na análise da Distorção Harmônica Total (DHT), observou-se que a maior distorção de tensão registrada foi de 2,336% na fase B. Considerando que a tensão nominal do sistema é de 220 V F-F ou 127 V F-N, valores inferiores a 1 kV, a Tabela 9 permite uma distorção harmônica total de até 10%. No entanto, para a corrente, o valor máximo observado foi de 11,601% na fase C, superior ao limite de 10%. Conforme mencionado anteriormente, embora tenha ocorrido uma melhora em comparação ao caso em vazio, o fato de o inversor estar operando com apenas 10% de sua potência nominal ainda resulta em uma elevada distorção de corrente. Esse comportamento pode ser atribuído a fatores como não atingimento do seu ponto ótimo de desempenho. Nessa condição, o controle das correntes harmônicas torna-se menos eficiente, já que o inversor foi projetado para operar com maior carga, onde a supressão de distorções harmônicas seria mais efetiva. Além disso, a injeção de potência ativa limitada não é suficiente para compensar adequadamente as oscilações harmônicas, resultando em uma distorção de corrente acima dos limites estabelecidos.

Nos dados apresentados, o fator de potência para as fases A, B e C encontra-se próximo de 1, com valores de 0,999 indutivo para todas as fases. Isso sugere que o sistema opera de maneira eficiente, apresentando uma quantidade mínima de potência reativa. Dessa forma, praticamente toda a energia ativa é convertida em trabalho útil, uma

vez que o fator de potência próximo de 1 indica uma baixa perda de energia na forma de reatividade.

A flutuação de tensão em todas as fases foi registrada como 0,002 pu para as fases A e B, e 0,001 pu para a fase C. De acordo com a Tabela 10, que apresenta os “Limites para Flutuação de Tensão” em sistemas com tensão nominal inferior a 1 kV, o limite permitido é de 1,0 pu. Comparando os valores observados (0,002 pu e 0,001 pu) com o limite estabelecido, conclui-se que a flutuação de tensão medida está significativamente abaixo do permitido, indicando que o sistema opera de forma estável e não apresenta grandes variações de tensão, o que é positivo para a qualidade da energia fornecida.

Assim foi concluído que, na análise em laboratório, o inversor avaliado já possui as tecnologias necessárias para reduzir as distorções harmônicas, estando em conformidade com as normas do Inmetro, o que justifica sua comercialização. No entanto, em condições de baixa corrente, os sensores apresentam dificuldades para realizar medições precisas, gerando distorções inevitáveis, mesmo com tecnologia avançada. Ao comparar o Caso A (em vazio) com o Caso B (com 10% da potência nominal), observou-se uma melhora na distorção harmônica no Caso B, embora ainda elevada devido à baixa carga. Em geral, o inversor é mais eficiente quando operado próximo à sua capacidade nominal, mas enfrenta limitações em cenários de baixa potência, onde a distorção de corrente é mais difícil de controlar.

4.2 CAMPO

4.2.1 Circuito de Medição

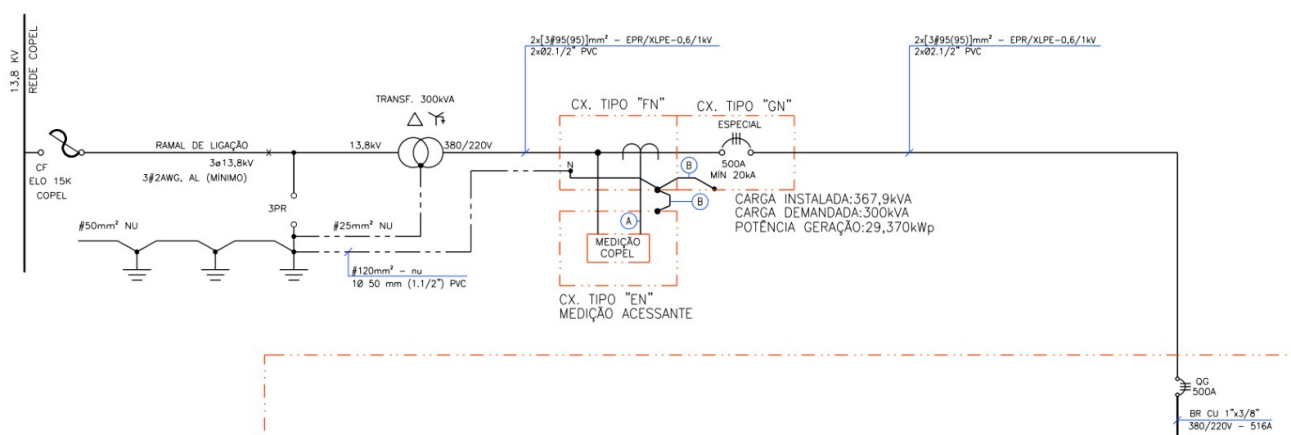
O sistema de conexão com a rede de distribuição, conforme mostrado na Figura 32, utiliza cabos de alumínio 3x #2AWG para o ramal de ligação, conectando a rede de 13,8 kV ao transformador. A proteção é garantida por elos fusíveis de 15k, enquanto o transformador trifásico de 300 kVA reduz a tensão para 380/220 V em um arranjo delta-estrela aterrado. Esse transformador, fundamental para a alimentação das cargas, está devidamente protegido e conectado a uma malha de aterramento que garante a segurança elétrica da instalação.

O cabeamento utilizado entre o transformador e o quadro geral do sistema é composto por condutores de $2 \times (3 \times 95 \text{ mm}^2)$ com isolamento EPR/XLPE, adequado para tensões de 0,6/1kV. Além disso, o sistema conta com caixas de proteção e medição (FN, EN e GN), que asseguram a proteção das cargas e a correta medição da energia. O disjuntor principal do sistema possui uma capacidade de 500 A, configurado para suportar correntes de curto-circuito de até 20 kA, garantindo a proteção contra sobrecorrentes.

O sistema foi projetado para atender a uma carga instalada de 367,9 kVA, com uma demanda de 300 kVA. A geração fotovoltaica integrada ao sistema contribui com uma potência de 29,37 kWp, sendo injetado completamente na rede elétrica. A interligação entre os sistemas de distribuição, geração e proteção é feita de maneira robusta, assegurando a eficiência e a segurança da instalação elétrica como um todo.

O equipamento de qualidade de energia foi colocado logo após o Disjuntor de 500 A do quadro geral sinalizado logo na parte inferior esquerda da figura 32, o diagrama completo pode ser visto no Anexo B e C.

Figura 32: Padrão de Entrada do Sistema



Fonte: Swell Engenharia Elétrica

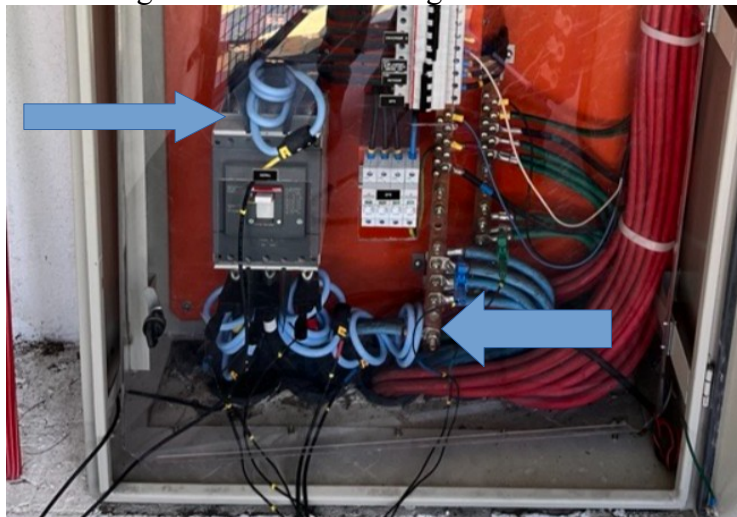
As Figuras 33 e 34 apresentam o equipamento instalado no sistema Carport. Devido à infraestrutura que não permitiu a instalação de um transformador de corrente (TC) para a medição da qualidade de energia, optou-se pelo uso de uma bobina de Rogowski com capacidade de até 5000 A. Para melhorar a precisão das medições, foi realizado um aumento no número de voltas no ponto de medição, conforme ilustrado nas imagens. Essa modificação foi necessária, uma vez que a bobina, com apenas uma volta, mede correntes muito superiores à capacidade nominal da estação de recarga, o que comprometeria a acuracidade dos dados coletados.

Figura 33: Equipamento de Qualidade de Energia Instalado



Fonte: Autor

Figura 34: Bobina de Rugowski Instalada



Fonte: Autor

4.2.2 Parâmetros

Os parâmetros utilizados seguem o que foi descrito no tópico 3.4, onde é detalhado o sistema fotovoltaico. No entanto, por se tratar de um sistema fotovoltaico, é necessário considerar fatores externos, como chuva, nuvens, sombreamento, e a presença ou ausência de veículos na estação de recarga. Esses fatores são extremamente relevantes, pois tornam a análise mais precisa. No entanto, como mencionado anteriormente, nem sempre haverá máxima geração de energia ou veículos em recarga em todos os momentos, o que pode influenciar as variáveis da análise.

As estações de recarga de veículos elétricos incluem dois carregadores rápidos em corrente contínua e corrente alternada conforme tópico 3.6, com potência total de até 103 kW, e três carregadores semirrápidos de corrente alternada conforme o tópico 3.5,

cada um oferecendo até 44 kW. No cenário de máxima utilização, o sistema alcança uma potência total de 338 kW, superando a capacidade do transformador, que é de 300 kVA. Isso sugere que o transformador trabalhará com potência acima da nominal. Isto significa que o conjunto de carregadores deverá operar com limitação de potência de forma a não superar a demanda máxima aceitável pelo transformador. Tal redução de potência é parte da configuração dos eletros postos.

4.2.3 Resultados

O período de análise compreendeu de 5 de novembro de 2024, a partir das 12 h (horário de Brasília), até 12 de novembro de 2024, às 12 h. Durante esse intervalo, houve registro de recarga de veículos elétricos. Os dados coletados foram essenciais para avaliar a qualidade da energia gerada pela usina solar e durante a recarga de veículos elétricos no carport e para determinar a energia mínima necessária ao funcionamento dos postos de recarga.

A Tabela 13 abaixo apresenta os valores máximos e mínimos de tensão registrados pelo analisador de qualidade de energia, isso inclui a tensão de linha, a tensão de fase e o horário em que cada medição foi realizada.

Tabela 13: Valores Mínimos e Máximos de Tensão

	Máximo		Mínimo	
	Tensão [V]	Horário	Tensão [V]	Horário
van[V]	225,8	07/11/2024 17:40	219,18	10/11/2024 16:10
vbn[V]	225,76	07/11/2024 17:40	219,2	12/11/2024 00:30
vcn[V]	226,14	07/11/2024 17:40	219,65	10/11/2024 16:10
vab[V]	390,83	07/11/2024 17:40	379,39	10/11/2024 16:10
vbc[V]	391,47	07/11/2024 17:40	380,24	12/11/2024 00:20
vca[V]	391,51	07/11/2024 17:40	380,13	10/11/2024 16:10

Fonte: Autor

Conforme descrito no módulo 8 do PRODIST, são estabelecidos parâmetros para as tensões mínima e máxima em relação à tensão de referência, definidos em três faixas distintas, conforme apresentado na Tabela 14. Para o nosso caso temos a tensão de referência de 200 V, assim os limites adequados entre 204,6 V e 231 V para a tensão fase neutro.

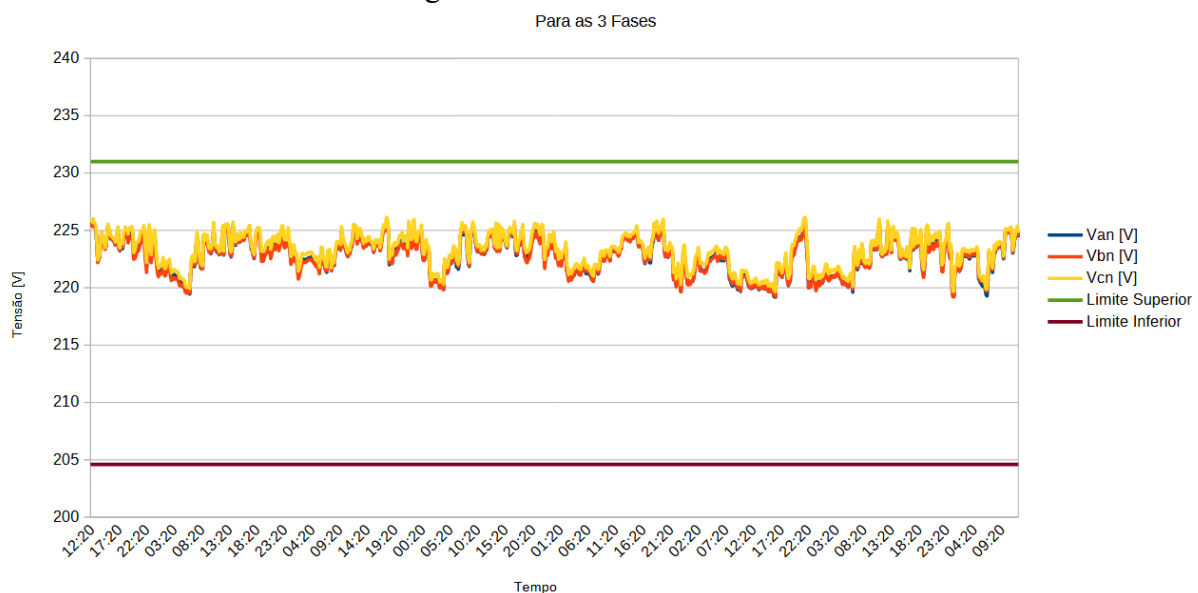
Tabela 14: Faixa de variação de tensão

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: (Borges, 2019)

Ao comparar os valores adequados com os limites máximos e mínimos apresentados na Tabela 13, observa-se que as tensões permaneceram dentro dos limites recomendados. Além disso, conforme ilustrado na Figura 35, durante o período de análise, as tensões mantiveram-se estáveis dentro desses limites. Um aspecto importante a ser destacado é o comportamento das tensões ao longo do dia: elas tendem a aumentar à medida que a geração solar cresce durante as horas diurnas e a diminuir durante a noite, quando o sistema fotovoltaico não está gerando energia.

Figura 35: Tensão Fase Neutro

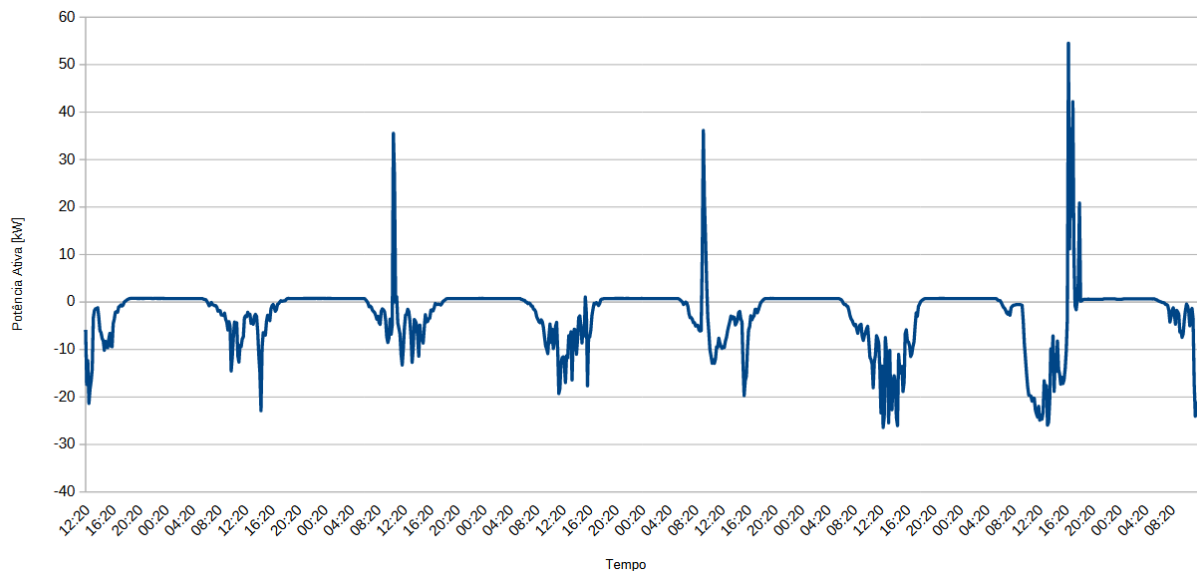


Fonte: Autor

Na Figura 36, é apresentada a potência ativa total ao longo do período de análise. Como o sistema está balanceado, o consumo de energia é aproximadamente igual nas três fases. Durante o período diurno, com geração de energia solar e sem recarga de veículos elétricos, a potência injetada é registrada como um valor negativo, devido ao

fluxo reverso de potência identificado pelo analisador de qualidade de energia. À noite, com a ausência de radiação solar e a interrupção da geração, observa-se uma leve potência positiva, correspondente ao consumo dos carregadores enquanto operam em modo de espera (standby).

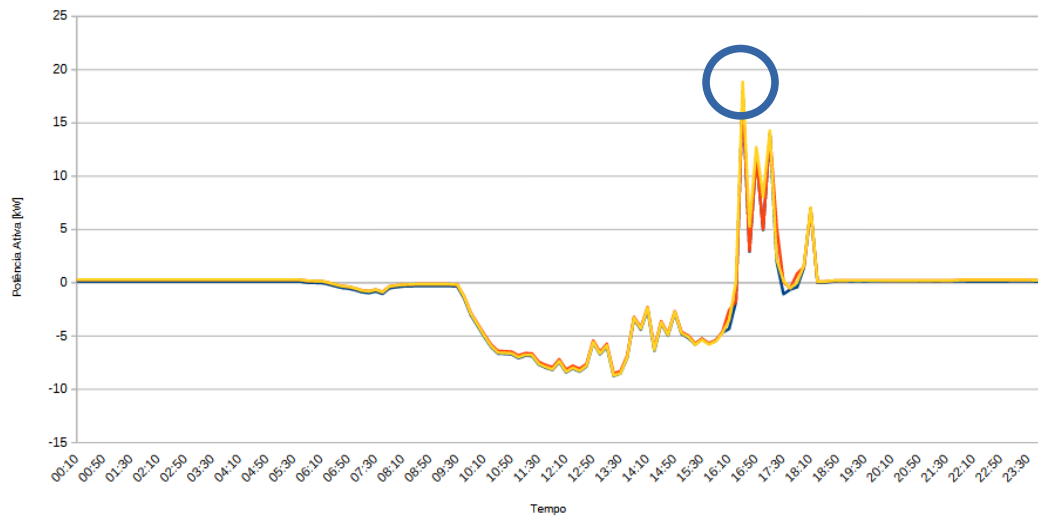
Figura 36: Potência Ativa Total



Fonte: Autor

A análise da Figura 36 evidencia a ocorrência de três picos de consumo de energia em três dias distintos, os quais foram causados pelo processo de recarga de veículos elétricos. Com base nos dados apresentados, é possível concluir preliminarmente que, durante os momentos de recarga, a energia gerada pelas placas solares não foi suficiente para atender integralmente à demanda dos veículos elétricos, tornando necessário o suporte adicional da rede da concessionária. Dessa forma, a energia total demandada pelos veículos corresponde à soma da energia gerada pelo sistema fotovoltaico no instante da recarga com a energia fornecida pela concessionária para suprir o déficit. Nota-se que a maior demanda da rede elétrica ocorreu em 11 de novembro de 2024, durante uma recarga realizada no final do dia, quando a geração solar já apresentava valores reduzidos conforme a Figura 37.

Figura 37: Potência Ativa Para o Dia 11/11/2024



Fonte: Autor

A Figura 37 apresenta a curva de energia das três fases. Durante o período analisado, a potência máxima demandada da rede foi de 54 kW que é a soma das 3 fases naquele instante de tempo, ocorrendo no intervalo de recarga do veículo elétrico, das 16h10 às 17h30 (horário de Brasília). As estações de recarga disponíveis como mencionados no item 3.5 e 3.6 possuem potências nominais de 22 kW e 60 kW, o que nos leva a duas possibilidades para justificar a demanda registrada: a primeira é que o veículo estava conectado à estação de 60 kW, com os 6 kW adicionais supridos pela geração fotovoltaica; a segunda hipótese é que o veículo conectado à estação de 60 kW não estava utilizando toda sua capacidade, demandando menos de 60 kW.

A Tabela 15 apresenta as principais informações do sistema durante o momento de maior demanda registrado no período analisado. Essa análise permite levantar dados relevantes sobre o desempenho e o comportamento do sistema sob as condições de maior carga que tivemos.

Tabela 15: Dados Durante Momento de Maior Demanda

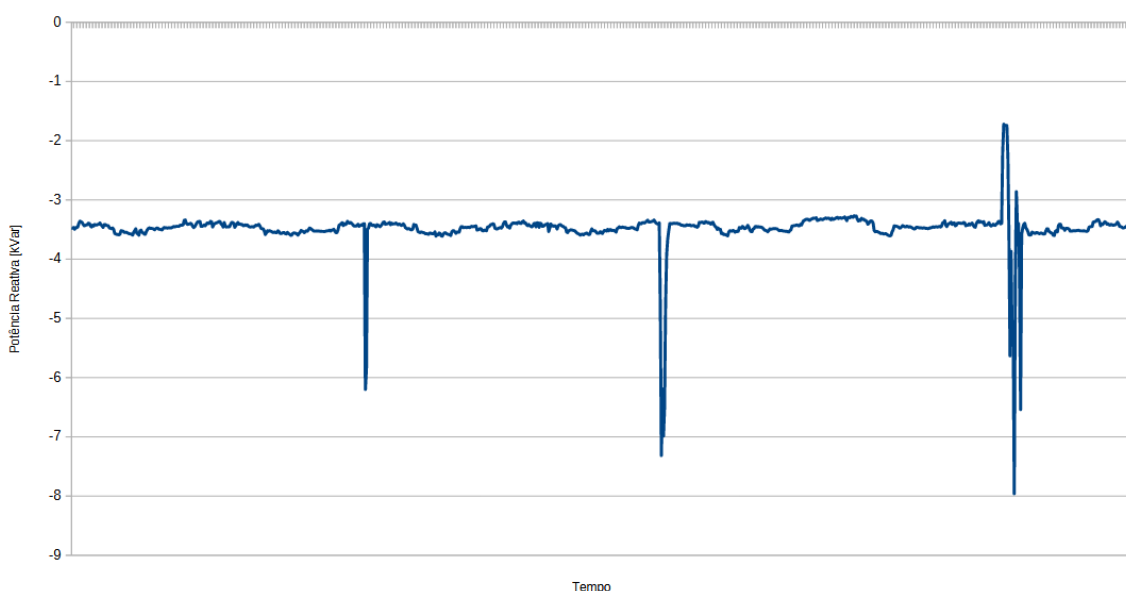
MOMENTO DE MAIOR POTÊNCIA CONSUMIDA	
Data	11/11/2024 16:30
Potência Ativa [kW]	54,52
Potência Reativa [kVar]	-5,63
Potência Aparente [kVA]	54,81
Fator de Potência	99,47%
Angulo de Fase (θ)	5,90°

Fonte: Autor

A Tabela 15 revela que a potência aparente registrada foi de 54,81 kVA. Considerando que o sistema é projetado para suportar até 300 kVA (capacidade nominal do transformador na entrada de energia), conclui-se que, no momento de maior carga observado no período, o sistema operou com apenas 18,33% de sua capacidade total. Outros aspectos relevantes incluem o fato de o sistema injetar energia reativa na rede e apresentar um fator de potência elevado, indicando bom desempenho e eficiência.

Conforme apresentado na Tabela 15, a energia reativa medida pelo analisador de qualidade de energia apresenta um valor negativo, indicando que o sistema está injetando energia reativa na rede. Além disso, o comportamento dessa energia reativa ao longo do tempo pode ser analisado através do gráfico ilustrado na Figura 38.

Figura 38: Energia Reativa Total



Fonte: Autor

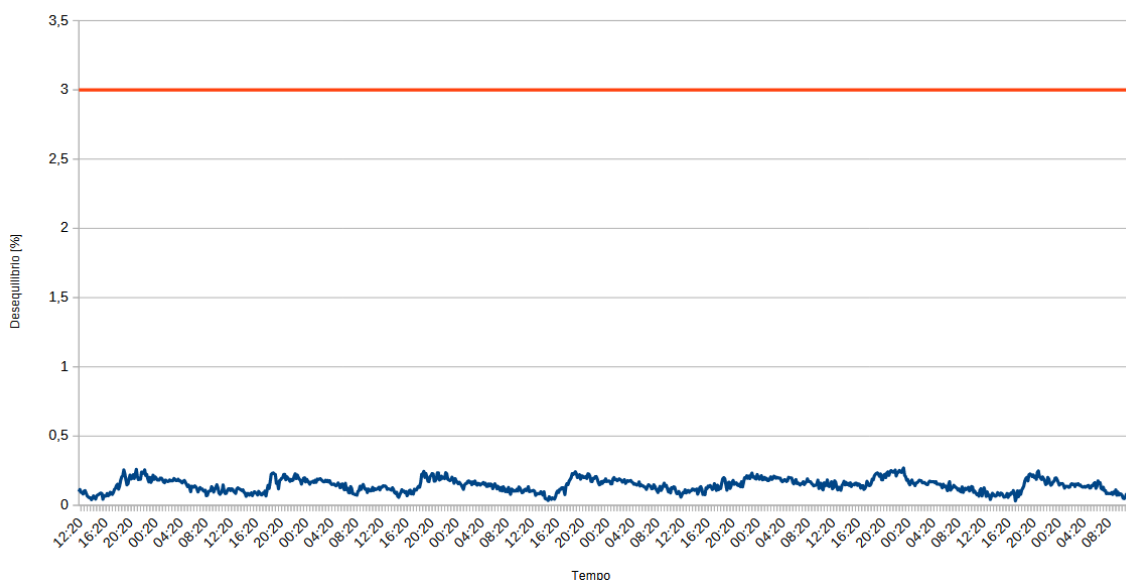
Observa-se que o sistema permanece injetando energia reativa na rede durante todo o período de funcionamento, independentemente de ser dia ou noite. É possível identificar três picos significativos de energia reativa injetada na rede, os quais coincidem precisamente com os momentos de carregamento de veículos elétricos. Esse comportamento indica que, embora os painéis solares apresentem uma leve diferença na energia reativa entre o período diurno e noturno, seu impacto não é tão expressivo quanto no momento de carregamento de veículos elétricos.

Durante o modo de espera (*standby*), as estações de recarga injetam aproximadamente 3,5 kVar na rede. Esse valor aumenta consideravelmente durante o

carregamento dos veículos, atingindo até 8 kVar, como registrado no dia 11/11/2024. Esse comportamento ocorre devido à operação dos componentes eletrônicos das estações de recarga, que demandam energia para manter o funcionamento do circuito de potência e do controle de carga, especialmente em momentos de maior consumo de energia ativa. Além disso, a configuração e a qualidade dos equipamentos de recarga podem influenciar diretamente a quantidade de energia reativa injetada na rede.

O desequilíbrio de tensão é outro indicador relevante da qualidade da energia elétrica, conforme estabelecido no Módulo 8 do PRODIST. Para tensões nominais abaixo de 1 kV, o limite permitido é de 3%. De acordo com o gráfico apresentado na Figura 39, os valores observados permanecem abaixo de 0,5%, indicando um desempenho dentro dos limites estabelecidos.

Figura 39: Desequilíbrio de Tensão

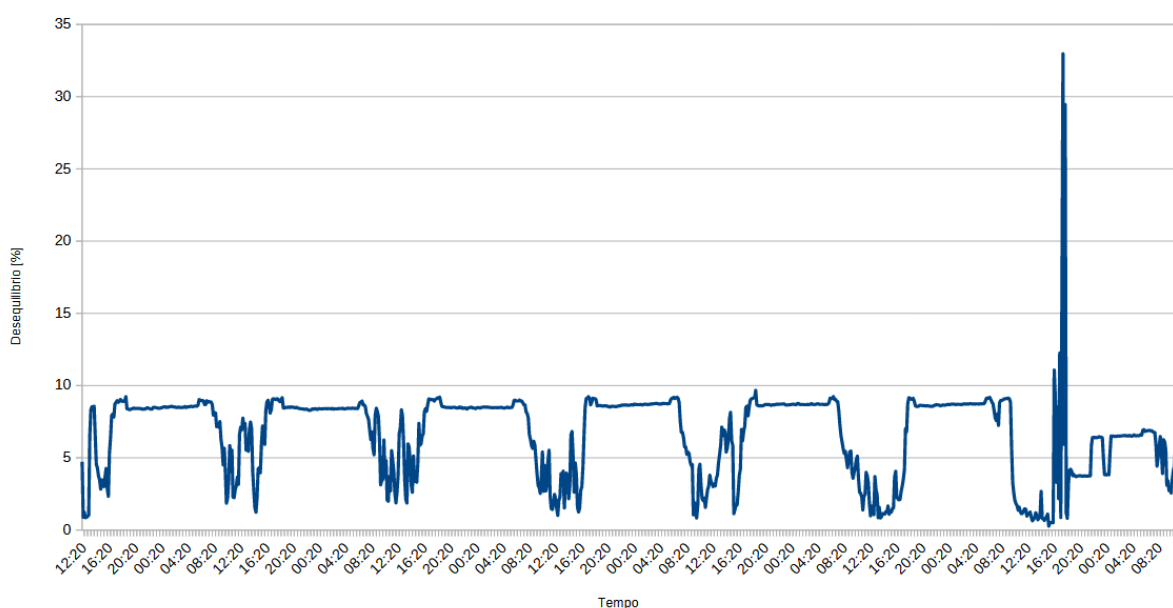


Fonte: Autor

Nota-se um padrão característico nos dados, em que os valores aumentam próximo às 19 horas, mas diminuem gradativamente com o passar do tempo, repetindo-se ao redor do mesmo horário diariamente. Esse comportamento pode ser causado por variações nas cargas conectadas à rede, como o acionamento de iluminação pública ou o aumento do consumo residencial durante o horário de pico. Essas mudanças podem gerar pequenas assimetrias na distribuição de carga entre as fases, refletindo no leve aumento do desequilíbrio de tensão observado nesse intervalo.

O Módulo 8 do PRODIST não estabelece limites específicos para o desequilíbrio de corrente. Contudo, ao analisarmos a Figura 40, observa-se um padrão bem definido: durante a noite, quando o inversor e as estações de recarga estão em modo stand-by, consumindo uma corrente mínima, o índice de desequilíbrio de corrente permanece próximo de 8%. Durante o dia, conforme a corrente varia devido à geração solar e ao carregamento dos veículos elétricos, os valores de desequilíbrio de corrente também apresentam variações, porém permanecem abaixo do índice observado à noite, ajustando-se conforme a magnitude da corrente.

Figura 40: Desequilíbrio de Corrente

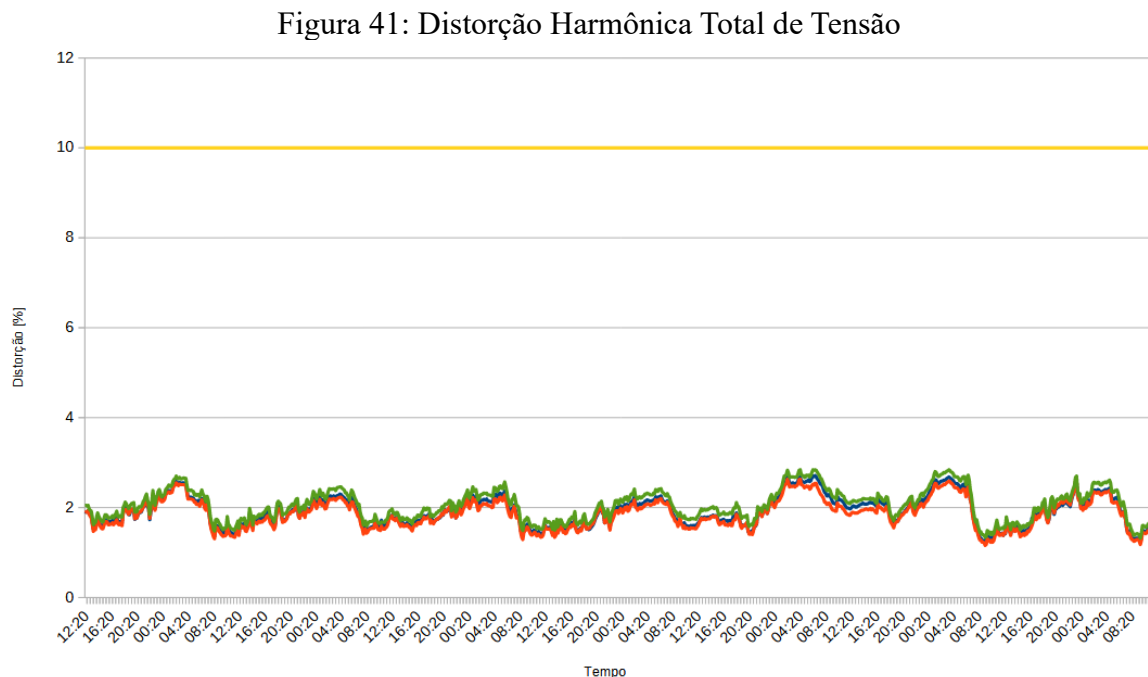


Fonte: Autor

No dia 11/11/2024, durante o período de maior demanda de potência do sistema, os valores de desequilíbrio de corrente ultrapassaram 30%, resultado de diversos fatores. Entre eles, o impacto das estações de recarga de veículos elétricos (carga não linear), que podem operar de forma intermitente. Além disso, os inversores fotovoltaicos, em condições de alta geração e consumo simultâneo, podem não compensar adequadamente o desequilíbrio, agravando os índices registrados.

Para a análise da distorção harmônica de tensão, considerando tensões inferiores a 1 kV e tomando como referência apenas a distorção harmônica total (THD), o limite estabelecido é de 10%. No presente estudo, a tensão de referência adotada foi de 220 V.

A Figura 41 abaixo apresenta os valores registrados de distorção harmônica total de tensão, obtidos por meio do analisador de qualidade de energia.



Fonte: Autor

Os grafico da Figura 41 mostram como a THD varia em função das condições operacionais, destacando padrões de interferências provenientes dos inversores fotovoltaicos e estações de recarga, quando eles começam a operar, ou ficam consumindo a corrente mínima para se manterem ligados, Porém por mais que tenham este padrão de comportamento é possível ver que os valores de distorção harmônica ficaram dentro do limite estabelecido apresentados no PRODIST.

Para as harmônicas de corrente, sabe-se que sua magnitude está diretamente relacionada à corrente elétrica, a qual depende da demanda de potência. Esse comportamento é observado tanto na solicitação de potência da rede elétrica, como no caso do carregamento de veículos elétricos, quanto na injeção de potência pela geração fotovoltaica. Como a corrente varia em função dessas demandas e não possui um valor fixo, diferentemente da tensão ou da frequência, não há limites específicos de qualidade de energia aplicáveis em todas as condições operacionais.

Quando a corrente elétrica apresenta valores muito baixos, a distorção harmônica tende a ser elevada, mas devido à baixa magnitude da corrente, o impacto sobre o sistema é insignificante. Conforme demonstrado na Figura 42, durante o período noturno e nas transições entre os estados de ligação e desligamento da geração fotovoltaica,

observa-se uma elevação nos valores de distorção harmônica. Entretanto, no período diurno, quando a corrente elétrica é maior, a distorção harmônica é reduzida, comportamento que é validado pelo gráfico de corrente apresentado na Figura 43, evidenciando essa relação.

Figura 42: Distorção Harmônica Total de Corrente

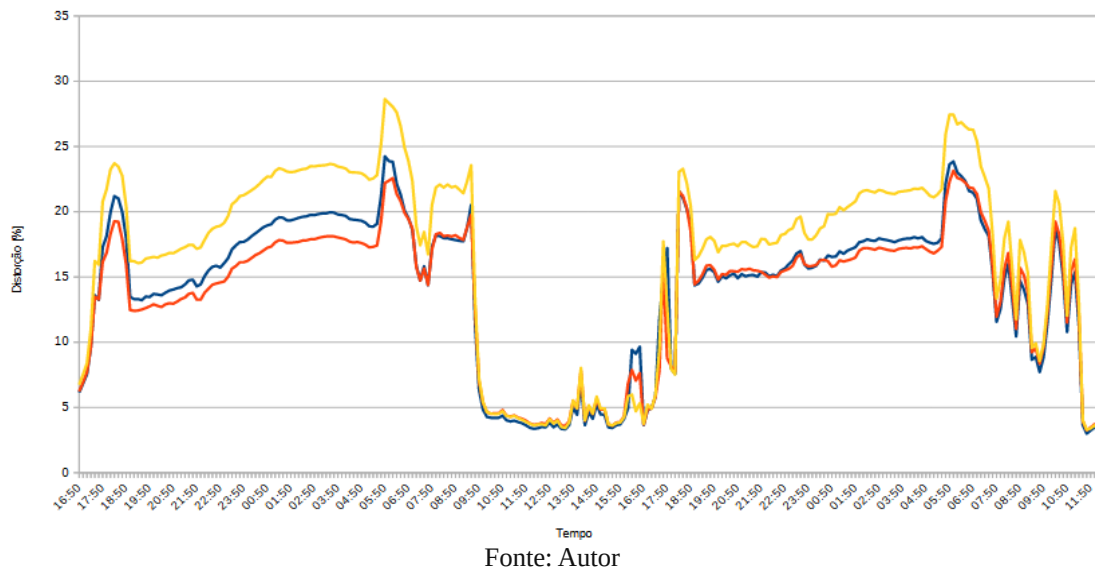
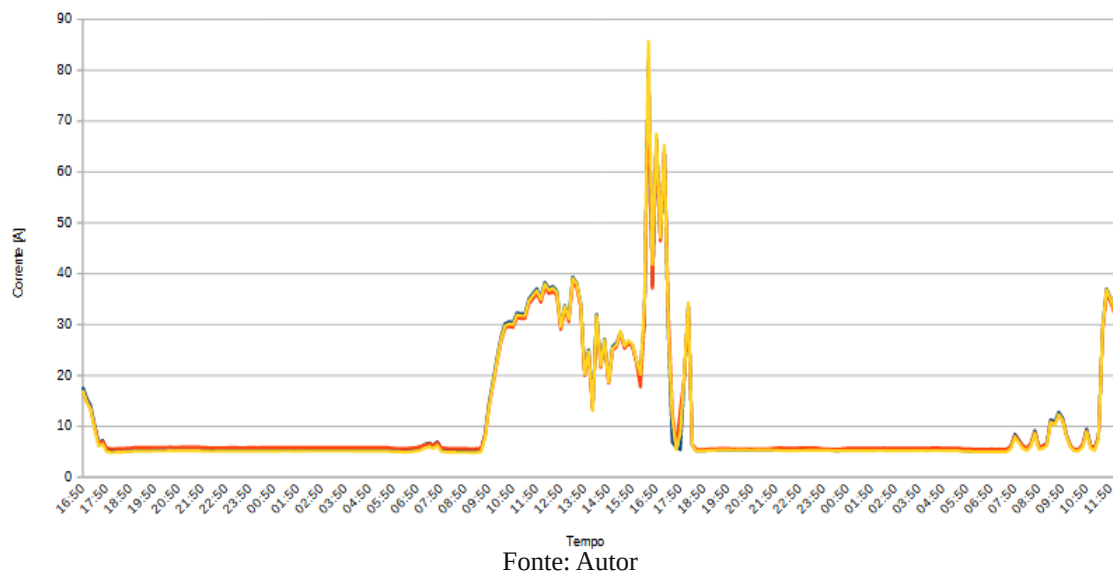


Figura 43: Corrente Elétrica Total
Para as 3 Fases



Para a análise dos valores de frequência, a Tabela 16 abaixo apresenta os valores máximos, mínimos e a média dos registros.

Tabela 16: Valores Medidos de Frequência

MÁXIMO	60,0876424817871
MÍNIMO	59,9583178219197
MÉDIA	60,0030188953724

Fonte: Autor

Os limites de frequência definidos pelas normas variam conforme o tempo de extrapolação permitido, mas, para o caso analisado, os valores máximos e mínimos registrados indicam conformidade com os critérios estabelecidos. De acordo com a norma, a frequência deve permanecer no intervalo de 59,9 Hz a 60,1 Hz, e os dados obtidos mostram que tanto os valores extremos quanto a média operacional estão dentro desse limite. Assim, independentemente das condições de operação do sistema carport, o desempenho do sistema permanece em conformidade com os padrões normativos.

O analisador de qualidade de energia registrou os valores médios de potência em kW, medidos em intervalos de 10 minutos. Esses. Para determinar o consumo total ao longo do período de análise, os valores médios de potência foram convertidos para energia (kWh) por meio da multiplicação por $\frac{1}{6}$, correspondendo à fração de uma hora equivalente ao intervalo de 10 minutos.

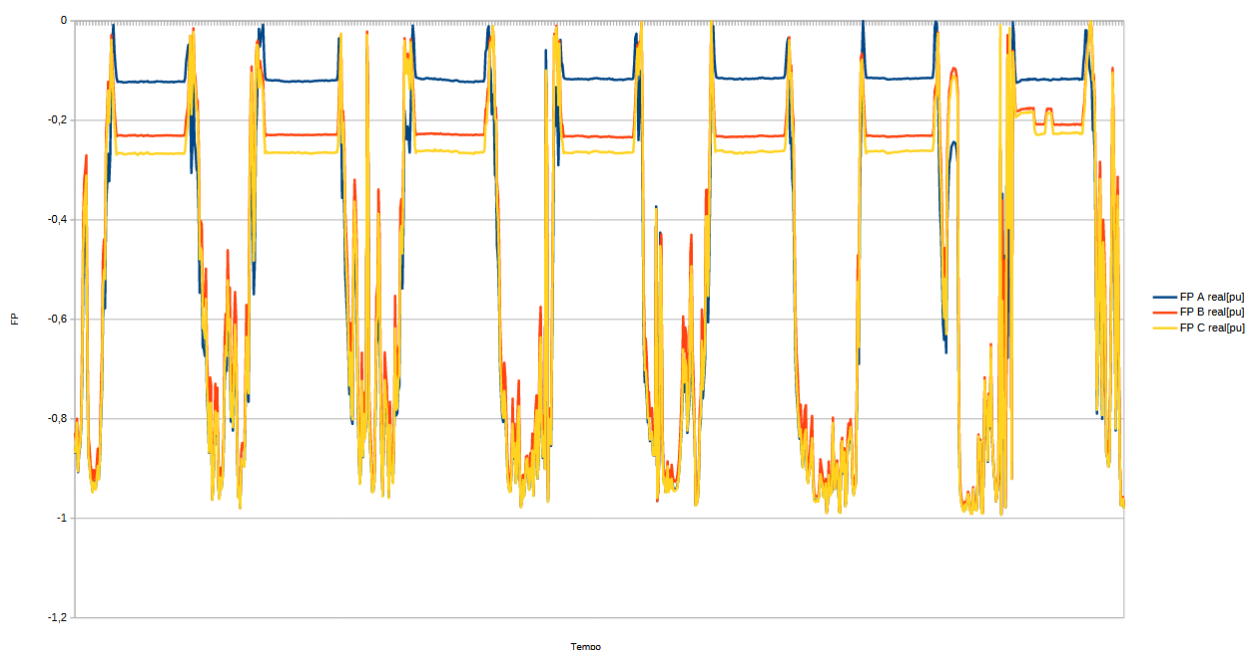
Após a conversão, os valores obtidos foram somados, resultando em um consumo total de -416,4 kWh. Esse valor negativo indica que, durante o período analisado, a energia injetada na rede foi superior à energia consumida, o cenário em que a injeção de energia na rede foi predominante, mesmo considerando os três carregamentos de veículos elétricos realizados no período.

Essa análise evidencia que a energia gerada foi suficiente para atender ao consumo local e ainda permitiu a exportação de excedente para a rede elétrica, caracterizando um saldo positivo de injeção de energia.

O analisador de qualidade de energia também realiza a medição do fator de potência ao longo do tempo. Como sabemos, o fator de potência varia de acordo com as características da carga conectada ao sistema, sendo influenciado por fatores como o tipo de carga (indutiva, capacitiva ou resistiva), o nível de consumo de energia ativa e a presença de energia reativa. A Figura 44 apresenta o gráfico da variação do fator de potência ao longo do período de análise aonde tanto a geração solar como a estação de

recarga estão funcionando. Observa-se que essa variação reflete nas mudanças nas condições de operação da corrente do sistema,

Figura 44: Fator de Potência

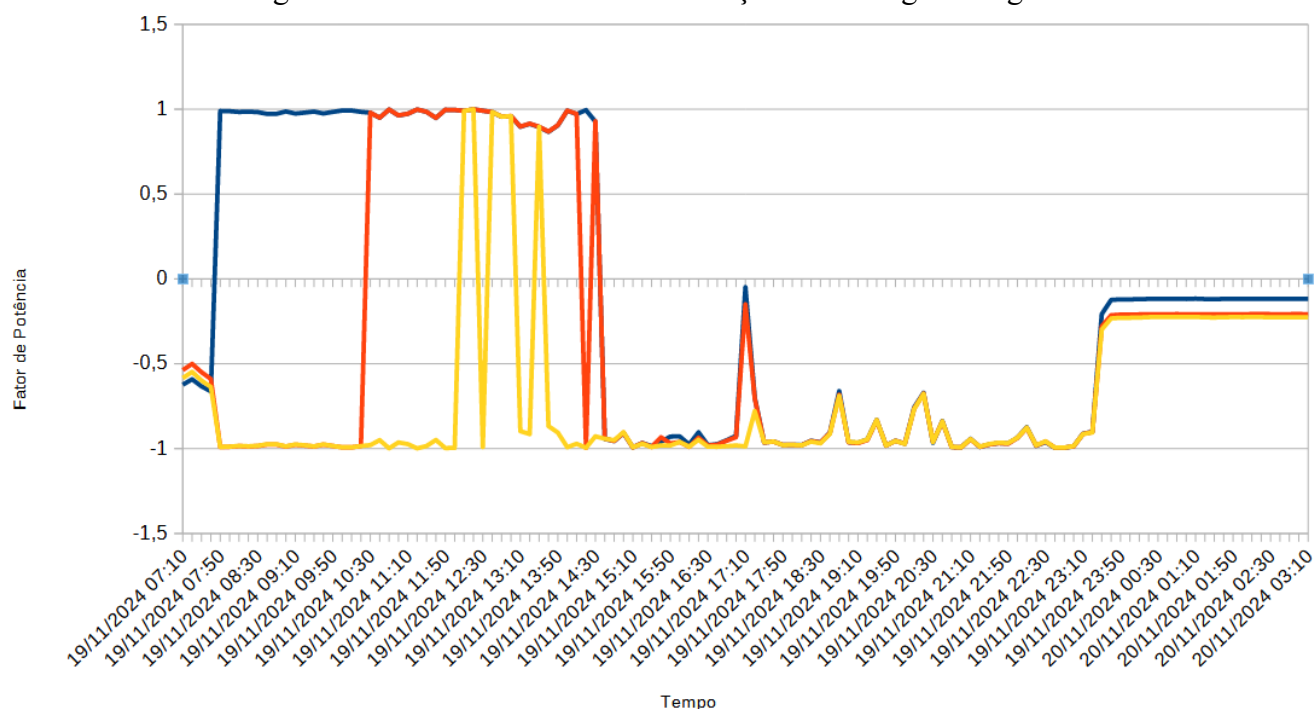


Fonte: Autor

Como pode ser observado, o fator de potência apresenta-se negativo ao longo do período analisado, com variações que acompanham tanto a geração solar quanto a demanda de potência do sistema. No entanto, a curva permanece predominantemente negativa, indicando a primeira vista que o sistema está injetando potência reativa capacitiva na rede. Para compreender de forma mais detalhada o comportamento de cada subsistema, foram realizadas análises específicas e isoladas de ambos os componentes.

Para isso, na Figura 45, o carregamento dos veículos elétricos foi desativado, permitindo a análise do fator de potência apenas com a geração solar em operação. De forma semelhante, a Figura 47 apresenta a situação em que a geração solar foi desligada, deixando apenas o carregamento dos veículos em funcionamento. Essas análises foram conduzidas para compreender a razão pela qual o sistema carport manteve o fator de potência negativo quando ambos os subsistemas estavam operando simultaneamente.

Figura 45: Fator de Potência com Estação de Recarga Desligada

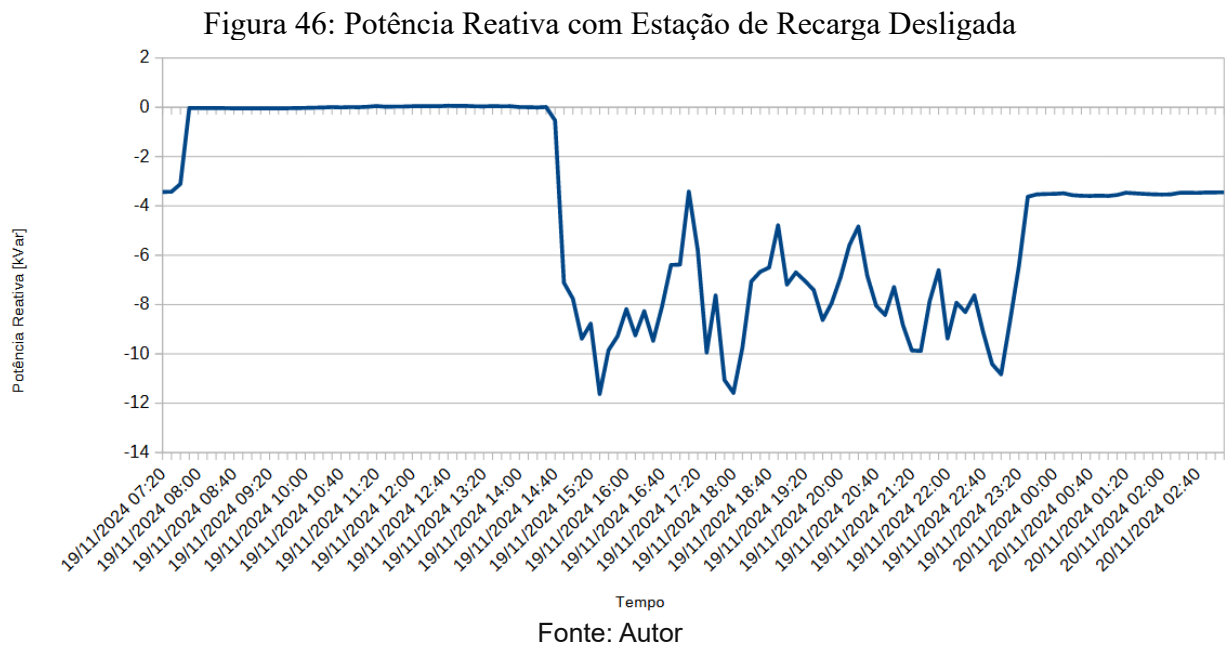


Fonte: Autor

Com o desligamento da estação de recarga (19/11/2024 das 07 horas às 15 horas), o fator de potência do sistema tornou-se positivo devido à operação exclusiva da geração fotovoltaica. Antes do desligamento, a estação de recarga atuava como uma carga conectada ao sistema, possivelmente com características indutivas, consumindo potência reativa e influenciando negativamente o FP. Em situações de operação, a estação poderia exigir potência reativa da rede, o que poderia gerar valores negativos de FP, dependendo do fluxo de potência no sistema. Após o desligamento, o único componente ativo restante foi o sistema fotovoltaico, cuja operação é focada na geração de potência ativa, com controle eficiente de potência reativa pelos inversores, resultando em um FP positivo.

No entanto, ao compararmos esse mesmo período com os valores de potência reativa visto na Figura 46, observamos que eles se mantêm próximos de zero. Isso pode ser explicado pelo fato de que os inversores fotovoltaicos modernos geralmente possuem sistemas de compensação de potência reativa, ajustando automaticamente a injeção ou o consumo de energia reativa para manter a qualidade da energia fornecida à rede. Dessa forma, a compensação de potência reativa realizada pelos inversores pode atenuar as flutuações e manter a potência reativa próxima de zero, o que contrasta com a leitura do

fator de potência do Rogowski, por estar com diferença entre o fundo de escala e o valor medido, pode efetuar uma medição em torno de 1, sendo positiva ou negativa.

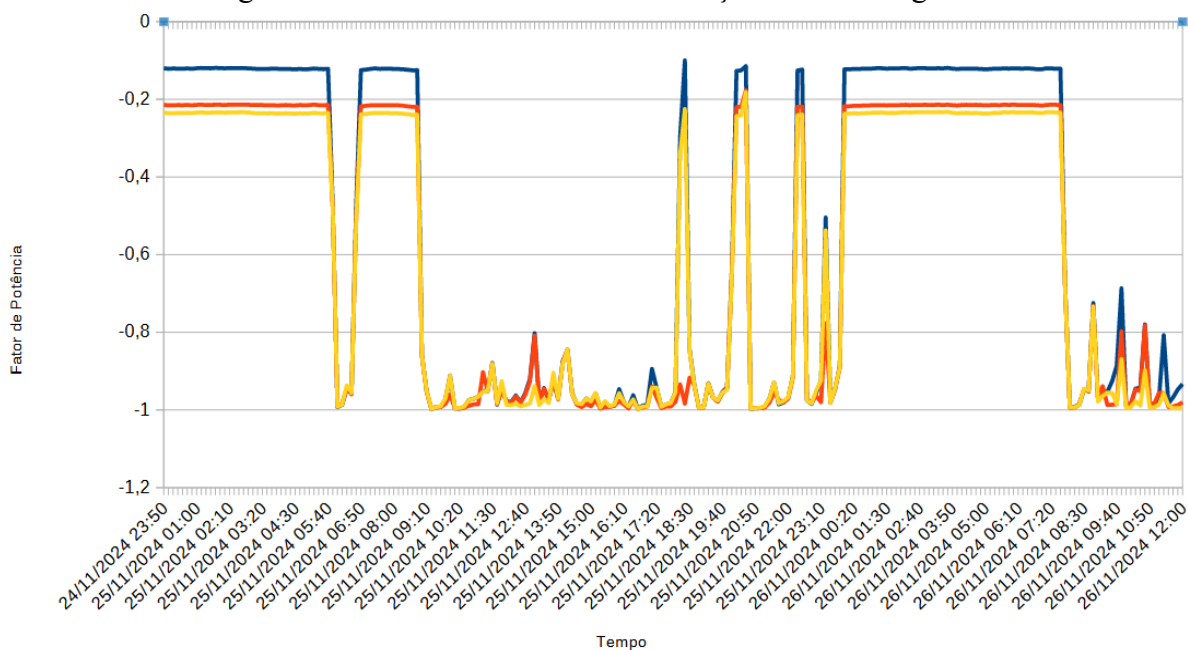


No outro caso analisado, o fator de potência apresentou-se negativo, alcançando valores próximos de -1 durante o carregamento do veículo e geração desligada. Esse comportamento indica que a estação de recarga, enquanto em operação, consome potência reativa da rede. Essa característica pode estar associada ao comportamento predominantemente indutivo do circuito interno da estação, o que sugere um projeto com foco em suas demandas específicas de funcionamento. O consumo de potência reativa em tais níveis reforça a importância de uma investigação mais detalhada sobre o desempenho interno da estação e sua interação com a rede elétrica. Apesar disso, um fator de potência próximo de 1, mesmo que negativo, é geralmente considerado adequado, desde que o consumo de potência reativa seja devidamente monitorado e controlado para evitar prejuízos à rede.

A Figura 47, por sua vez, apresenta a operação do sistema em uma configuração específica: a estação de recarga está ativa, enquanto a usina solar permanece desligada. Nessa condição, verifica-se que a estação de recarga opera sem o suporte da geração solar, tornando-se a única responsável pelas demandas do sistema. Os resultados observados corroboram que a potência reativa registrada nas Figuras 38 e 48 é proveniente do circuito interno da estação, que parece ser a fonte de consumo ou injeção

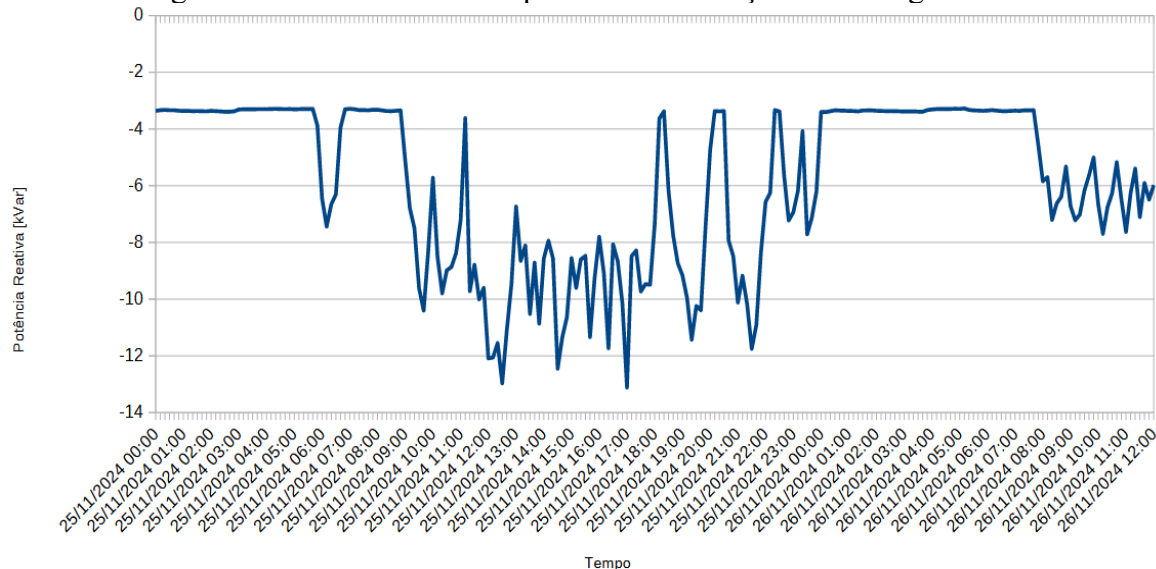
de energia reativa na rede. Esse comportamento reforça a necessidade de uma análise detalhada dos componentes internos da estação de recarga, com o objetivo de compreender a origem exata desse consumo ou injeção de potência reativa. Tal análise será crucial para propor otimizações que assegurem uma operação mais eficiente, mitigando impactos negativos na rede elétrica.

Figura 47: Fator de Potência Com Geração Solar Desligada



Fonte: Autor

Figura 48: Potência Reativa apenas com a Estação de Recarga de VE



Fonte: Autor

Dessa forma, observa-se que os valores de fator de potência e energia reativa requerem uma análise mais detalhada para melhor compreensão e interpretação. Uma possível causa para as discrepâncias observadas pode estar relacionada à configuração da bobina de Rogowski, que apresenta um fundo de escala significativamente superior aos valores medidos. Com a bobina ajustada para 4 espiras, a corrente nominal é de 1200 A, enquanto a corrente média registrada situa-se em torno de 100 A, o que pode influenciar a precisão das medições.

É importante destacar que, independentemente de o fator de potência apresentar valores negativos ou positivos, sua proximidade de 1 indica um desempenho satisfatório sob o aspecto de eficiência energética. No entanto, o comportamento da potência reativa gerada pela estação de recarga requer atenção especial. Os valores registrados mostram um consumo elevado de potência reativa, alcançando picos de até -13 kVar. Essa característica evidencia a necessidade de uma análise criteriosa do circuito interno da estação para identificar a origem desse comportamento e propor soluções que possam mitigar impactos na rede elétrica.

5. CONCLUSÃO

O pensamento de que as fontes de energia renováveis devem ter seu uso priorizado e intensificado na participação da matriz elétrica se justifica tanto por razões econômicas, devido à redução no custo das faturas de energia, quanto por questões ambientais, já que se tratam de fontes inesgotáveis, com baixo impacto ambiental e maior facilidade de implantação, muitas vezes aproveitando infraestruturas já existentes.

Nesse contexto, os sistemas carport, que integram geração solar fotovoltaica e estações de recarga para veículos elétricos, vêm ganhando destaque como uma solução sustentável e inovadora. No entanto, o crescimento desse tipo de sistema também reforça a importância de manter a qualidade da energia elétrica. O tema é amplamente debatido devido aos desafios técnicos associados à expansão das fontes renováveis, especialmente em sistemas conectados à rede de distribuição. Assim, é fundamental identificar e mitigar os possíveis impactos negativos que esses sistemas podem causar na qualidade da energia elétrica.

Portanto, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise da qualidade de energia do sistema carport, permitindo a obtenção de dados e resultados apresentados no item 4. Inicialmente, no item 4.1, a análise foi realizada em laboratório, com o propósito de avaliar o desempenho do inversor, verificar se a qualidade de energia e o funcionamento do equipamento estavam dentro dos padrões esperados e compreender melhor os valores fornecidos pelo analisador de qualidade de energia. Essa etapa foi fundamental para estabelecer uma metodologia consistente e parâmetros claros de análise, que pudessem ser aplicados de forma mais precisa na avaliação dos dados coletados em campo.

No entanto, a análise realizada no item 4.2 proporcionou uma compreensão mais ampla sobre o funcionamento e a qualidade de energia do sistema carport ao longo de um período de monitoramento. Por meio da avaliação dos dados registrados pelo analisador de qualidade de energia e da comparação com os critérios estabelecidos pelas normas vigentes, foi possível concluir que o sistema está em conformidade com os parâmetros de qualidade de energia elétrica (QEE) definidos pela ANEEL.

Dessa forma, este trabalho proporcionou um aprendizado significativo, tanto na área de análise da qualidade de energia quanto na elaboração e aprimoramento de uma metodologia de ensaio. Ao longo do desenvolvimento, foi possível aprofundar o

conhecimento técnico relacionado ao monitoramento e avaliação de sistemas carport, além de consolidar práticas metodológicas que podem ser aplicadas em futuros estudos ou em projetos similares, contribuindo para o avanço das pesquisas e soluções no campo da geração distribuída e da mobilidade elétrica.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

É importante ressaltar que, embora este trabalho tenha abordado aspectos significativos da qualidade de energia em sistemas carport, ele também abriu espaço para identificar variáveis e temas que merecem estudos futuros. Entre essas, destacam-se questões como a análise do aterramento do sistema, que pode influenciar diretamente a segurança e o desempenho; as interferências eletromagnéticas entre estações de recarga próximas; e a interação entre os diversos elementos do sistema, considerando possíveis impactos e interferências mútuas.

Além disso, a expansão da frota de veículos elétricos surge como uma oportunidade para ampliar o suporte energético durante períodos de maior demanda, como no fechamento mensal de consumo, mas também traz desafios técnicos que requerem análise detalhada. Estudos futuros poderiam focar nas consequências dessa expansão, tanto do ponto de vista técnico quanto regulatório, promovendo maior eficiência e estabilidade na operação desses sistemas.

Espera-se que este trabalho de conclusão de curso sirva como base para pesquisas que aprofundem o conhecimento sobre a qualidade de energia em sistemas integrados de geração e recarga. Ele também visa inspirar novos estudos voltados para outros ensaios normativos, incentivando o desenvolvimento de metodologias mais abrangentes e a evolução das capacidades laboratoriais no campo da energia. A continuidade desses esforços poderá, no futuro, consolidar avanços tanto acadêmicos quanto práticos, contribuindo para o fortalecimento da geração distribuída e mobilidade elétrica no Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. Edição revisada e atualizada.
- [2] Pereira, José Waltrudes Castanheira; Cataldi, Márcio; Miranda, Nathália; **“SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA NO BRASIL”**, p. 1172-1181 . In: . São Paulo: Blucher, 2017.
- [3] FERREIRA, José Paulo; DIAS, Márcio José. **Veículos Elétricos e Híbridos: História e Perspectivas para o Brasil**. ETIS - Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 40–54, 2022. Disponível em:
- [4] NOCE, Toshizaemon. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Orientador: Prof. Dr. Denilson Laudaes Rodrigues.
- [5] BOLLEN, M.; HASSAN, F. **Integration of Distributed Generation in the Power System**. New York: Wiley-Blackwell, 2011.
- [6] RODRIGUES, M. et al. **Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: uma visão geral**. Eletrên. Potên., Capo Grande, v 19, n.2,p. 193-207,mar./mai.2014.
- [7] SOUSA, Marina Maria de Liberador Cury. **Veículos elétricos: a rede de inovação da pesquisa e desenvolvimento no Brasil**. Limeira: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas, 2015.
- [8] ZEGARRA SÁNCHEZ, F. **Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[9] MORENO, Isaac Vinicius dos Santos; ANTUNES, Leonardo Klingenfus; BURIOLA, Vinícius Henrique. **Análise da qualidade da energia em instalações elétricas alimentadas por grupo gerador**. 2016. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016

[10] Toledo, L. C. S.; Coube, M. V. A. **Procedimentos para ensaios de cintilação/flicker segundo as normas ABNT 16149 e ABNT 16150**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Setor de Tecnologia.

[11] DIAS, M. V. X. **Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá

[12] LEAL, M. H. **Realização de estudos para avaliação do desempenho de inversores fotovoltaicos frente a variação de tensão no ponto de acoplamento comum**. [2023 – Universidade Federal do Paraná.], [s.d.].

[13] BARASSA, Edgar; CRUZ, Robson Ferreira da; MORAES, Henrique Botin. [Título do capítulo]. In: BARASSA & CRUZ CONSULTING (Org.). **1º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica**. [Local de publicação]: [Editora], 2020. p. [Páginas do capítulo].

[14] STOPFER, Nicole; SOARES, Anuska; CASTRO, Nivalde José de; ROSENTAL, Rubens (Org.). **A Mobilidade Elétrica na América Latina: Tendências, oportunidades e desafios**. [Local de publicação]: Konrad Adenauer Stiftung, [Ano de publicação].

[15] SILVA, João da; SANTOS, Maria dos; et al. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Mobilidade e Desenvolvimento Regional e Urbano. **Guia de eletromobilidade: orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus**. Brasília: MDES, 2023. 150 p.

[16] SLOWIK, Peter; ARAÚJO, Carmen; DALMANN, Tim; FACANHA, Cristiano; et al. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**. Estudo elaborado por International Council on Clean Transportation (ICCT) sob demanda da GIZ (Agência Alemã de Cooperação Internacional) e do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC). Brasília: MDIC, 2018. 120 p.

[17] PROCOBRE. **Como abastecer um carro elétrico?** Instalação de equipamentos de recarga em casa. [S.l.]: CPFL Energia, 2022. 50 p

[18] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **NOTA TÉCNICA Nº 0043/2010- SRD/ANEEL**: Proposta de abertura de Consulta Pública para o recebimento de contribuições visando reduzir as barreiras para a instalação de geração distribuída de pequeno porte, a partir de fontes renováveis, conectada em tensão de distribuição. 1 ed. Aneel, 2010. 20 p

[19] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687: Altera a Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. 1 ed. Aneel, 2015. 25 p.

[20] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 724**: Aprova revisões dos Módulos 3 e 5 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST e altera as Resoluções Normativas nº 395/2009, nº 414/2010 e nº 506/2012. 1 ed. Aneel, 2016. 33 p.

[21] BARROSO, Antonio C.; LARAIA, Lilian; BARBOSA, Wesley L. **Road map de conectividade para veículos elétricos**. Projeto GIZ DKTl - Sistemas de Propulsão Eficiente (PROMOB-e). Brasília, 2020.

[22] CHARAVARA, Matheus da Costa.” **Estudo das alterações de tensão em pontos de conexão de fontes de geração distribuída fotovoltaicas.**” Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021. 120 f. Orientador: Prof. Dr. Rogers Demonti.

[23] COOPER, Ellison; MARTINS JUNIOR, Wellington Morales. **Aplicação de painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora complementar de energia elétrica em residências**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

[24] SANTIAGO, João Vitor Assad. **O mercado emergente de energia solar fotovoltaica no Brasil entre 2012 e 2018: avanços, desafios e perspectivas**. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2019.

[25] DIAS, Edmilson José. **O potencial da geração solar FV no Brasil: histórico e futuro**. Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 8., 2023, Belo Horizonte. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geração Distribuída**. Belo Horizonte: [Nome da Instituição Organizadora], 2023. p.

[26] **INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID COMO COBERTURA DE UM ESTACIONAMENTO UTILIZANDO CARPORT SOLAR**. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, [S. l.], v. 3, n. 6, p. e361574, 2022.

[27] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **MÓDULO 8 – QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 10 ed. Brasil, 2018. 88 p.

[28] QUEIRÓS, Vitor Leonel Faria. **Desenvolvimento de central fotovoltaica para carregamento de veículos elétricos e respetivo impacto na qualidade de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2022. Disponível em: [URL inválido removido]. Acesso em: [data de acesso].

[29] BORGES, Caio Franco. **Análise da qualidade da energia elétrica em um sistema fotovoltaico conectado à rede**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia De Goiás, Itumbiara, Goiás, 2019.

[30] NEVES NETO, João Cardoso das. **Investigação da frequência de ressonância com compensação reativa através da análise da qualidade da energia elétrica em instalações elétricas hospitalares com equipamentos**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

[31] ALMEIDA, J. P.; SILVA, R. T.; LIMA, A. G. **Gestão de demanda elétrica em sistemas industriais**: estudo de caso. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 15-28, maio 2022.

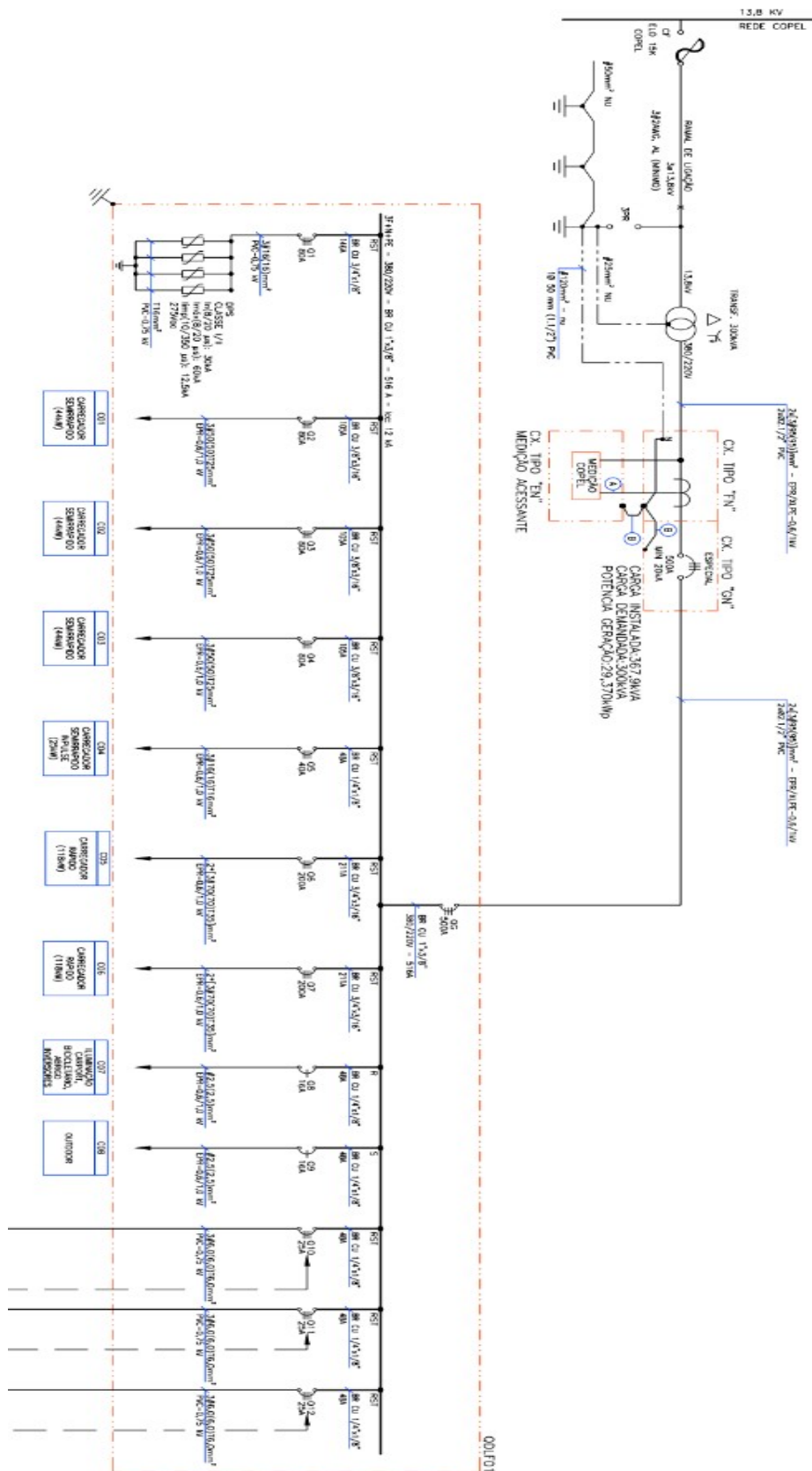
[32] OLIVEIRA, M. F.; SANTOS, L. R. Otimização da demanda contratada em instalações comerciais. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 15-28, maio 2022.

[33] PINTO NETO, Aime Fleury de Carvalho. **Avaliação dos impactos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão**. 2016. 109 f. Tese - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia, USP, São Paulo, 2016.

ANEXO A – FICHA TÉCNICA INVERSOR SIW500H M3

Especificações técnicas	SIW500H SK020	SIW500H ST030 M3	SIW500H ST036 M3	SIW500H ST040 M3
Eficiência				
Eficiência máxima	97,10%		98,65%	
Eficiência europeia	96,70%		98,40%	
Entrada				
Potência máxima	30.000 W	45.000 W	54.000 W	60.000 W
Tensão de entrada máxima	800 V		1.100 V	
Faixa de operação do MPPT	200 V – 750 V		200 – 1.000 V	
Faixa de MPPT em máxima potência	300 – 550 V	500 – 800 V	520 – 800 V	540 – 800 V
Tensão nominal de entrada	350 V		600 V	
Tensão de partida		200 V		
Corrente máxima por entrada		13 A		
Corrente de curto-circuito por entrada		20 A		
Número de MPPTs		4		
Número de entradas por MPPT		2		
Saída				
Conexão à rede		Trifásica		
Potência nominal de saída	20.000 W	30.000 W	36.000 W	40.000 W
Potência aparente máxima	22.000 VA	33.000 VA	40.000 W	44.000 VA
Tensão de saída nominal	220 V / 3F+N+PE		380-440-480 V / 3F+N+PE	
Frequência de rede CA nominal		50 Hz / 60 Hz		
Corrente de saída máxima	58,0 A	50,4 A	61,1 A	67,2 A
Fator de potência ajustável		0,8 adiantado ... 0,8 atrasado		
Distorção harmônica total máxima		≤3%		
Proteções				
Proteção AFCI		Sim		
Proteção anti-ilhamento		Sim		
Proteção contra polaridade CC invertida		Sim		
Monitoramento da isolação		Sim		
Supressor de surto CC / CA		Tipo II / Tipo II		
Monitoramento de correntes residuais		Sim		
Proteção contra sobrecorrente CA		Sim		
Proteção contra curto-circuito CA		Sim		
Proteção contra sobretensão CA		Sim		
Proteção de sobrecorrente CC		Topologia Fuseless		
Proteção contra sobretemperatura		Sim		
Geral				
Faixa de temperatura de operação		-25 – 60 °C		
Umidade relativa de operação		0% – 100% (sem condensação)		
Altitude de operação		0 – 4.000 m (derating acima de 2.000)		
Resfriamento		Convecção natural		
Display		LEDs e Wi-Fi + App		
Comunicação		RS485 / USB		
Portal de monitoramento		Conforme datalogger utilizado		
Peso (incluindo suporte de montagem)		43 kg		
Nível de ruído		<50 dB		
Consumo noturno		<5,5 W		
Dimensão (incluindo suporte de montagem)		640 × 530 × 270 mm		
Grau de proteção		IP66		
Modo de operação		On-Grid		
Topologia		Sem transformador		
Otimizador compatível		SUN2000-600W-P		
Normas atendidas				
Segurança		EN IEC 62109-1/2		
EMC		EN 61000-3-11/12		

ANEXO B – Diagrama Unifilar Parte A



ANEXO C – Diagrama Unifilar Parte B

