

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO RENAN ZAMPIER

SOLUÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM
GERENCIAMENTO DE DEMANDA MÁXIMA

CURITIBA

2025

LEONARDO RENAN ZAMPIER

SOLUÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM
GERENCIAMENTO DE DEMANDA MÁXIMA

Projeto de Dissertação apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientador: Prof. Dr. Bruno Knevez
Hammerschmitt

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Zampier, Leonardo Renan

Solução de carregamento de veículos elétricos com gerenciamento de demanda máxima. / Leonardo Renan Zampier. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Knevitiz Hammerschmitt

1. Veículos elétricos. 2. Carregadores de bateria (Veículos elétricos). 3. Algoritmos genéticos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Aoki, Alexandre Rasi. IV. Hammerschmitt, Bruno Knevitiz. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LEONARDO RENAN ZAMPIER**, intitulada: **SOLUÇÃO DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM GERENCIAMENTO DE DEMANDA MÁXIMA**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE RASI AOKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 02 de Julho de 2025.

Assinatura Eletrônica

04/07/2025 15:08:00.0

ALEXANDRE RASI AOKI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

08/07/2025 13:15:04.0

ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA)

Assinatura Eletrônica

04/07/2025 14:22:24.0

MATEUS DUARTE TEIXEIRA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

Com o constante aumento da adesão de veículos elétricos como meio de transporte, carregar todos esses veículos se torna um problema para ser resolvido. O tipo de carregador mais aderido pelos usuários para carregar veículos elétricos são os carregadores residenciais, dada sua praticidade. Porém em edificações com muitos destes carregadores isso deve ser gerenciado para que não sobrecarregue a instalação elétrica. Neste estudo aborda-se uma proposta de algoritmo para gerenciamento de carregadores de veículos elétricos aplicando-se uma otimização baseada no algoritmo genético NSGA-III, visando assim alocar da melhor maneira a demanda destes equipamentos sem passar da limitação da instalação elétrica atual. Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada com abordagem qualitativa e quantitativa. O estudo se desenvolveu com base em referencial teórico, legislações e normas nacionais e internacionais, e também literatura relevante na área. O desenvolvimento do algoritmo se baseou em linguagem de programação Python com utilização de otimização a partir de algoritmo genético NSGA-III, que tem um bom desempenho para trabalhar com cenários multiobjetivos. Foram estipulados quatro cenários nos quais foram sendo variadas as condições, e no quarto cenário foi apresentada a versão com a implementação da otimização com algoritmo genético. Para testar esta otimização o algoritmo foi aplicado em três cenários com condições de entrada diferentes para comparação de resultados, podendo-se assim avaliar a adaptabilidade da solução em diferentes aplicações. Percebeu-se que dos quatro cenários avaliados o que continha a otimização se destacou em resultados, e entre os cenários comparativos esse modelo mostrou constantemente o melhor desempenho para diferentes variáveis de entrada. Com a avaliação dos resultados obtidos foi observado que a solução não só é viável como também pode ter incrementos futuros, como ser complementada com fontes de energia renovável, incluir refinamento no cálculo do carregamento ou também ser complementada com medidores de energia inteligentes.

Palavras-chave: veículos elétricos; NSGA-III; otimização de recarga; carregadores.

ABSTRACT

With the constant increase in the adoption of electric vehicles as a means of transportation, charging all these vehicles becomes a problem to be solved. The type of charger most adopted by users to charge electric vehicles are residential chargers, given their practicality. However, in buildings with many of these chargers, this must be managed so as not to overload the electrical installation. This study addresses a proposed algorithm for managing electric vehicle chargers by applying an optimization based on the NSGA-III genetic algorithm, thus aiming to optimally allocate the demand of these equipment without exceeding the limitation of the current electrical installation. This research is characterized as an applied study with a qualitative and quantitative approach. The study was developed based on theoretical framework, national and international legislation and standards, and also relevant literature in the area. The algorithm development was based on Python programming language using optimization from the NSGA-III genetic algorithm, which has good performance for working with multi-objective scenarios. Four scenarios were stipulated in which conditions were varied, and in the fourth scenario, the version with the implementation of optimization with genetic algorithm was presented. To test this optimization, the algorithm was applied in three scenarios with different input conditions for result comparison, thus being able to evaluate the adaptability of the solution in different applications. It was observed that among the four evaluated scenarios, the one containing optimization stood out in results, and among the comparative scenarios, this model constantly showed the best performance for different input variables. With the evaluation of the obtained results, it was observed that the solution is not only viable but can also have future increments, such as being complemented with renewable energy sources, including refinement in the charging calculation, or also being complemented with smart energy meters.

Keywords: electric vehicles; NSGA-III; charging optimization; chargers.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: CRESCIMENTO DAS VENDAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS ENTRE 2010 E 2023..... | 13 |
| Figura 2: CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES INSTALADOS ENTRE 2015 E 2023..... | 14 |
| Figura 3: PROJEÇÃO DE CARREGADORES DE VES INSTALADOS POR AMBIENTES | 15 |
| Figura 4: HISTÓRICO DE VENDAS DE VES NO BRASIL POR ANO | 16 |
| Figura 5: VENDAS DE VES POR REGIÃO DO BRASIL EM AGOSTO/24 | 17 |
| Figura 6: CLASSIFICAÇÃO DOS NÍVEIS CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS | 23 |
| Figura 7: COMPARAÇÃO DOS CARREGADORES DE VES MAIS VENDIDOS (EUA) | 31 |
| Figura 8: DETALHE DE ESPECIFICAÇÃO DO CONECTOR NEMA 14-50 | 32 |
| Figura 9: COMPARAÇÃO DOS CARREGADORES DE VES VENDIDOS NO BRASIL | 32 |
| Figura 10: DETALHE DAS CONEXÕES DE ALIMENTAÇÃO DOS CARREGADORES..... | 33 |
| Figura 11: FLUXOGRAMA PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA..... | 51 |
| Figura 12: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DESENVOLVIDO | 52 |
| Figura 13: PERFIL DE CARGA COMERCIAL E ADIÇÃO DE UM VE DE CADA TIPO POR HORA..... | 56 |
| Figura 14: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 1 | 57 |
| Figura 15: PERFIL DE CARGA COMERCIAL COM ADIÇÃO DE 2 VES DE CADA TIPO POR HORA | 58 |
| Figura 16: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 2 | 58 |
| Figura 17: PERFIL DE CARGA COMERCIAL COM ADIÇÃO DO MÁXIMO POSSÍVEL DE VES POR HORA | 59 |
| Figura 18: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 3 | 60 |
| Figura 19: PERFIL DE CARGA COMERCIAL COM ADIÇÃO DO MÁXIMO DE VES POR HORA E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III..... | 61 |
| Figura 20: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 4 | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 21: APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO NO PERFIL DE CARGA COMERCIAL PARA SÁBADOS | 62 |
| Figura 22: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 4: VARIAÇÃO SÁBADOS..... | 63 |
| Figura 23: APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO NO PERFIL DE CARGA COMERCIAL PARA DOMINGOS E FERIADOS..... | 64 |
| Figura 24: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 4: VARIAÇÃO DOMINGOS E FERIADOS | 64 |
| Figura 25: COMPARAÇÃO DE FATORES DE CARGA PARA CADA CENÁRIO | 66 |
| Figura 26: COMPARAÇÃO DE FATORES DE CARGA ENTRE OS PERFIS UTILIZADOS | 66 |
| Figura 27: NÚMERO MÁXIMO DE CARREGAMENTOS ATIVOS EM DUS POR TIPO DE CARREGADOR..... | 67 |
| Figura 28: POTÊNCIA TOTAL DOS CARREGADORES POR TIPO E POR CENÁRIO | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------|----|
| Tabela 1: RESUMO DA LITERATURA | 43 |
|--------------------------------------|----|

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| ABVE | Associação Brasileira do Veículo Elétrico |
| BEVs | Veículos elétricos à bateria |
| CA | Corrente alternada |
| CC | Corrente contínua |
| DR | Disjuntor residual |
| DUs | Dias Úteis |
| HEV | Veículo elétrico híbrido |
| HEV flex | Veículo elétrico híbrido <i>flex</i> |
| IA | Inteligência artificial |
| MHEV | Veículo elétrico híbrido suave |
| NSGA-III | <i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm III</i> |
| PHEVs | veículos plug-in híbridos |
| SOC | <i>State of Charge</i> |
| VE | Veículo elétrico |
| V2G | Veículo-para-rede |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-------------------------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | CONTEXTO | Erro! Indicador não definido. |
| 1.1 | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA | 18 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 19 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA | 20 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO DOCUMENTO | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 22 |
| 2.1 | CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS | 22 |
| 2.2 | NORMAS VIGENTES | 24 |
| 2.2.1 | ABNT NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão | 24 |
| 2.2.2 | IEC 61851 – Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos | 25 |
| 2.2.3 | ABNT NBR 17019:2022 - Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalações em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos | 25 |
| 2.2.4 | IEC 60364-7-722:2018 – Instalações elétricas de baixa tensão – Requisitos para instalações específicas – veículos elétricos | 26 |
| 2.2.5 | IEC 60309 – Plugues e tomadas para uso industrial | 27 |
| 2.2.6 | NBR IEC 62196-1:2021 - Plugues, tomadas, tomadas móveis para veículo elétrico e plugues fixos para veículos elétricos - Recarga condutiva para veículos elétricos;..... | 28 |
| 2.2.7 | NTC 902210 Copel – Sistemas de Recarga de VE | 28 |
| 2.3 | INFRAESTRUTURA ELÉTRICA PARA CARREGAMENTO DE VES | 29 |
| 2.3.1 | Avaliação da Capacidade da Rede Elétrica Local | 29 |
| 2.3.2 | Quadro Elétrico..... | 30 |
| 2.3.3 | Compatibilidade com o Carregador | 31 |
| 2.4 | OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS | 34 |

| | | |
|------------|---|-------------------------------|
| 2.5 | GERENCIAMENTO DE DEMANDA..... | 34 |
| 2.5.1 | Análise de dados | 35 |
| 2.5.2 | Inteligência artificial | 35 |
| 2.5.3 | Programação de demanda | 36 |
| 2.5.4 | Armazenamento de energia | 36 |
| 2.5.5 | Geração distribuída | 36 |
| 2.6 | ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO NSGA-III..... | 37 |
| 2.7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO..... | 38 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 39 |
| 3.1 | REDE DE DISTRIBUIÇÃO..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.2 | ENERGIAS RENOVÁVEIS | 39 |
| 3.3 | UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS PARA OTIMIZAÇÃO DE RECARGA | 41 |
| 3.4 | OUTRAS ABORDAGENS RELEVANTES..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 44 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | Erro! Indicador não definido. |
| 4.2 | CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA | 46 |
| 4.3 | UNIVERSO DE PESQUISA E AMOSTRAGEM..... | 47 |
| 4.3.1 | Delimitação do campo de pesquisa..... | 47 |
| 4.3.2 | Estrutura considerada..... | 47 |
| 4.4 | MÉTODO..... | Erro! Indicador não definido. |
| 4.4.1 | Desenvolvimento da pesquisa..... | 50 |
| 4.4.2 | Aplicação do NSGA-III na solução | 51 |
| 4.4.3 | Descrição do fluxo do modelo | 52 |
| 5 | TESTES E ANÁLISES DE RESULTADOS | 55 |
| 5.1 | ADIÇÃO DE UM VE DE CADA TIPO POR HORA | 55 |

| | | |
|------------|--|--------------------------------------|
| 5.2 | ADIÇÃO DE DOIS VES DE CADA TIPO POR HORA..... | 57 |
| 5.3 | ALOCAÇÃO SIMPLES DE VES DENTRO DO LIMITE DE DEMANDA..... | 58 |
| 5.4 | CURVA DE CARGA COMERCIAL TÍPICA DE DIAS ÚTEIS E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III | 60 |
| 5.5 | CURVA DE CARGA COMERCIAL TÍPICA DE SÁBADOS E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III..... | 62 |
| 5.6 | CURVA DE CARGA COMERCIAL TÍPICA DE DOMINGOS E FERIADOS E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III..... | 63 |
| 5.7 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 65 |
| 5.7.1 | Análise da aplicação do NSGA-III..... | 65 |
| 5.7.2 | Avaliação da otimização com outras curvas de carga comerciais | 66 |
| 5.7.3 | Quantidade de carregadores ativos..... | 67 |
| 5.7.4 | Avaliação de impactos financeiros na infraestrutura considerada | 68 |
| 5.7.5 | Análise comparativa com a revisão de literatura | 69 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 71 |
| 6.1 | CONCLUSÕES | Erro! Indicador não definido. |
| 6.2 | TRABALHOS FUTUROS | 71 |
| | REFERÊNCIAS | 73 |

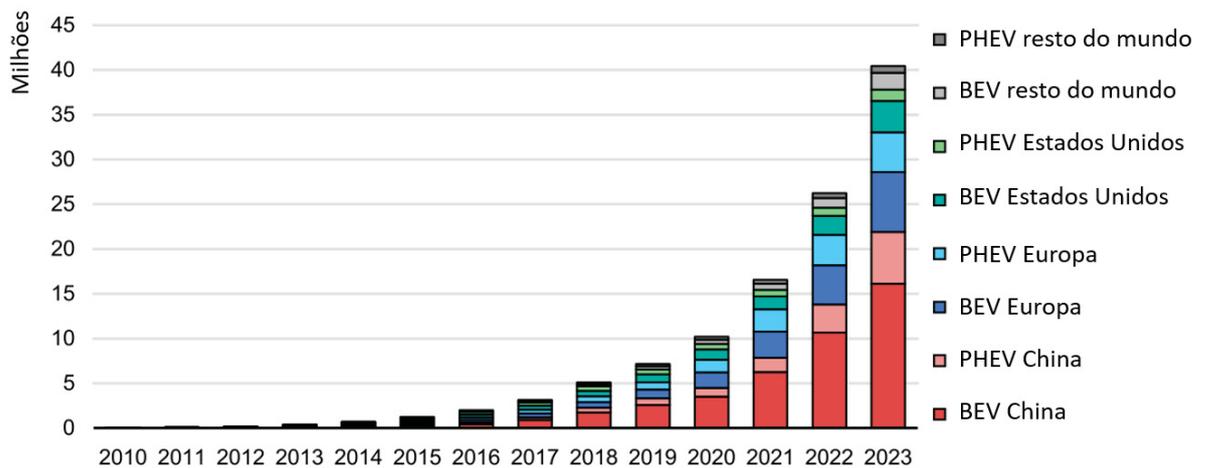
1 INTRODUÇÃO

Com o agravamento da crise energética e ambiental em escala mundial, o desenvolvimento de energias renováveis tornou-se uma necessidade urgente, então os veículos elétricos (VEs) entram nessa discussão como parte importante na redução do impacto do setor de transporte e da indústria automotiva. Muitos países têm adotado políticas para incentivar o uso dos VEs como alternativa para reduzir poluição sonora e emissão de gases (Jaruwatanachai et al. 2023), visto que a European Commission (2019) colocou como meta zerar a emissão de gases de efeito estufa até 2050.

Com a redução dos preços dos componentes e a consolidação das tecnologias, aproximadamente 14 milhões de novos VEs foram registrados globalmente apenas em 2023, totalizando cerca de 40 milhões de unidades, considerando apenas os veículos de passeio veículos elétricos à bateria (BEVs), e veículos *plug-in* híbridos (PHEVs), conforme mostrado nos dados históricos da Figura 1.

Figura 1: CRESCIMENTO DAS VENDAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS ENTRE 2010 E 2023

Tendência da frota global de veículos elétricos, 2010-2023



Nota: BEV = veículo elétrico à bateria; PHEV = veículo híbrido *plug-in*. Computados somente veículos de passeio.

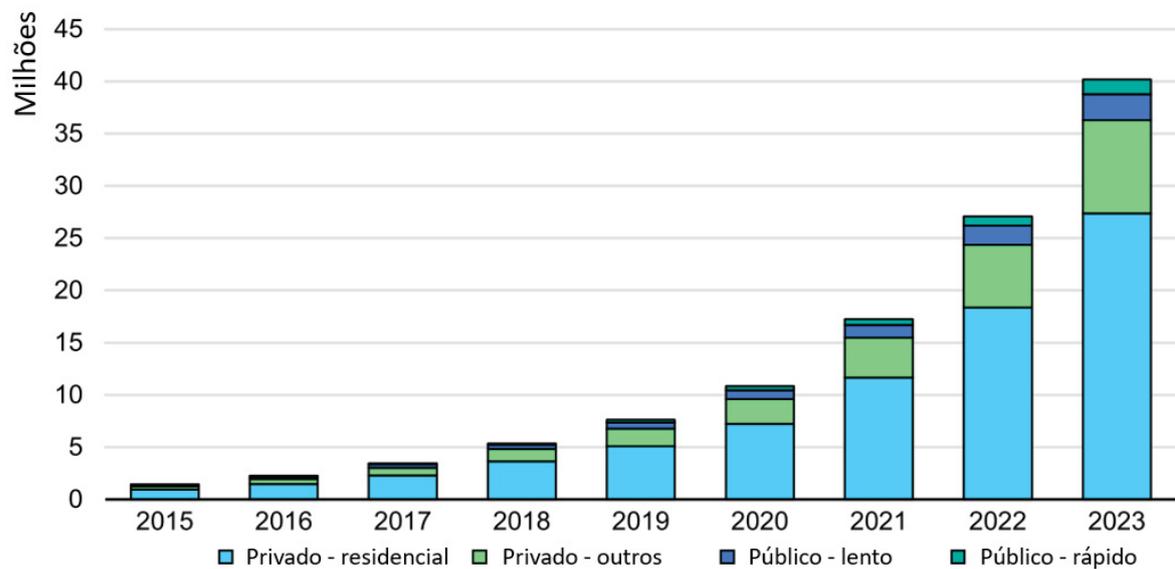
FONTE: adaptado de International Energy Agency (2024a)

Esse aumento das vendas deve continuar com os veículos cada vez mais acessíveis, com uma variedade maior de modelos e ainda mais potentes. A previsão é que em 2025, 15% de todos os veículos vendidos no mundo sejam elétricos, e se a taxa de crescimento for mantida, as emissões de CO2 nos transportes podem chegar a um valor médio de zero até 2050 (Saraswathi; Ramachandran, 2024).

Para recarregar esses veículos, hoje estima-se que existam 10 carregadores elétricos privados para cada carregador público instalado, visto que a maioria dos proprietários de VEs prefere efetuar a recarga durante a noite, podendo assim tirar vantagem das tarifas mais baixas devido à baixa demanda fora dos horários de pico (International Energy Agency, 2024a), conforme indicado na Figura 2.

Figura 2: CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES INSTALADOS ENTRE 2015 E 2023

Pontos de carregamento de veículos leves públicos e privados instalados por classificação de potência (público) e por tipo (privado), 2015-2023

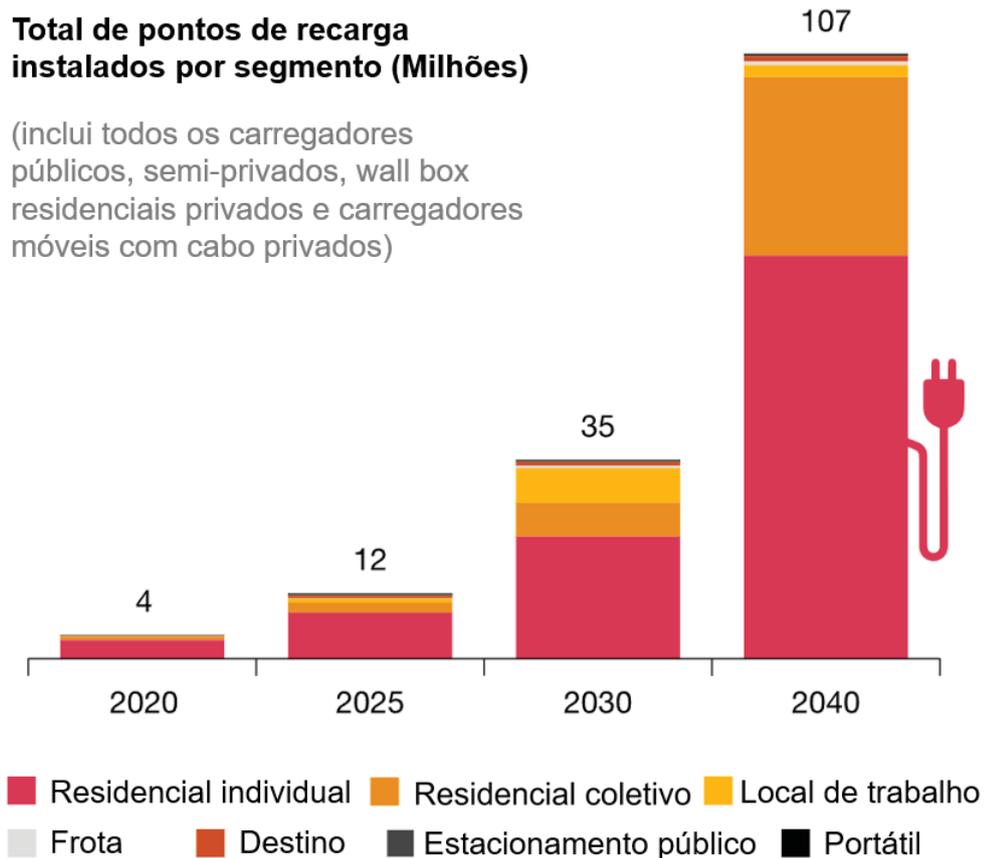


Notas: "privado - outros" refere-se a pontos de carregamento que não são nem publicamente acessíveis nem pontos de carregamento em residências privadas. O estoque de carregamento doméstico é estimado com base no estoque de veículos leves elétricos e premissas regionais sobre as proporções de equipamentos de abastecimento de veículos elétricos (EVSE)/veículos elétricos (EV).

FONTE: adaptado de International Energy Agency (2024a)

Conforme um estudo feito pela PwC (2022), empresa de auditoria avaliação de mercado, a tendência futura sugere que o carregamento de VEs em casa cresça muito mais rápido se comparado às estações de carregamento públicas, conforme demonstrado na Figura 3. Esses dados reforçam o problema de conciliar diversos carregadores em um mesmo edifício ou condomínio, visto que provavelmente a estrutura instalada não foi dimensionada para receber carregadores de VEs, e dificilmente estes ambientes possuem uma instalação elétrica adequada para receber vários carregadores ligados ao mesmo tempo. Este cenário também pode ser aplicado analogamente em garagens de edifícios públicos, empresas de transporte, locação de veículos, etc.

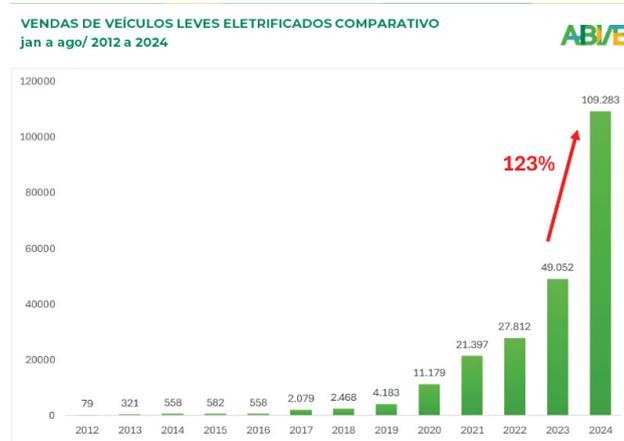
Figura 3: PROJEÇÃO DE CARREGADORES DE VES INSTALADOS POR AMBIENTES



FONTE: adaptado de PwC (2022)

No Brasil, segundo estudo da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) (2024a), os VEs do tipo *plug-in* têm dominado o mercado, registrando aumento de 123% nas vendas no último ano, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4: HISTÓRICO DE VENDAS DE VES NO BRASIL POR ANO



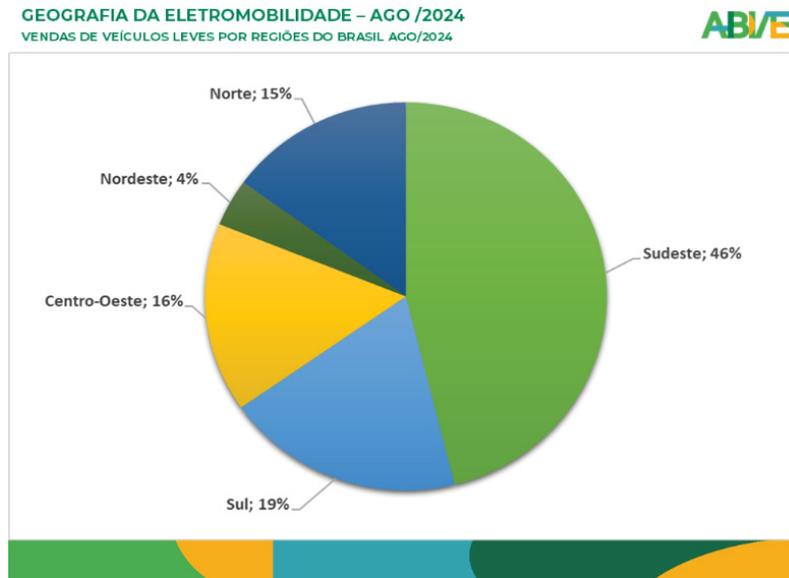
FONTE: Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2024a)

Assim como em outros países, o crescimento das vendas gerou movimentação na parte de infraestrutura. Atualmente estão disponíveis mais de 10.600 pontos de recarga públicos e semipúblicos (ABVE, 2024). Desse total, 89% são do tipo AC de carga lenta (9.506) e 11% do tipo DC (1.109), de carga rápida.

Desde o início da série histórica da ABVE (2012) até agosto de 2024, o Brasil já contabiliza mais de 329 mil veículos eletrificados leves em circulação de todas as tecnologias (BEV, PHEV, HEV, HEV flex e MHEV). Desses, pelo menos 181 mil são elétricos plug-in, considerando BEV e PHEV. Os números divulgados em outubro de 2024 indicam uma média de quase 14 mil novos VEs por mês em 2024 (Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2024b), liderados pelos BEVs, 71% das vendas, e os demais 29% englobam modelos híbridos.

Na distribuição de vendas por região, a região Sul aparece em segundo lugar com 19% dos novos veículos, conforme mostrado na Figura 5, tendo Curitiba, Maringá, Londrina e São José dos Pinhais como maiores compradores no Estado do Paraná.

Figura 5: VENDAS DE VES POR REGIÃO DO BRASIL EM AGOSTO/24



FONTE: Associação Brasileira do Veículo Elétrico (2024a)

Além disso, outro problema a ser resolvido, este sendo consequência da necessidade de carregamento de VEs, é que existem diversas maneiras para atualizar uma instalação elétrica para atender à essa demanda de carregadores. Se for considerado que o momento de recarga de todos os veículos ao mesmo tempo seria durante o horário de pico, aumentar a potência instalada, refazer todo o cabeamento e sistema de proteção para atender este pico não seria a melhor alternativa financeiramente falando.

Portanto, pode-se considerar que um dos maiores limitadores para a implementação de sistemas de recarga em condomínios e empresas é a limitação das instalações elétricas existentes, visto que em projetos já executados a demanda disponível da potência total instalada não condiz com o necessário para carregar diversos veículos ao mesmo tempo.

Uma das alternativas para se contornar as limitações com relação às instalações elétricas é o gerenciamento de demanda, inclusive recomendada pela NTC 902210 da COPEL (2022a), onde de forma manual ou automatizada, há um processo para se controlar a demanda utilizada para carregamento de acordo com a necessidade, aproveitando momentos de menor uso da capacidade instalada ou variação do custo do

kWh por exemplo, ou também um mecanismo de agendamento e/ou revezamento para carregamentos, tornando assim possível a rede suprir as demandas (Wang; Thompson, 2019).

Com agendamentos é possível ainda otimizar os horários de recarga, pensando na operação da rede de distribuição e nos custos de recarga em horários alternativos (He et al. 2012) em sintonia com os horários em que os veículos estão fora de funcionamento, geralmente fora dos horários de pico da rede.

Já para o sistema de gerenciamento de demanda, avaliando o que há disponível de tecnologia no mercado, precisa-se considerar equipamentos com capacidade de comunicação e atuação remotas, medição de energia e algum tipo de alarme para fraudes e/ou falhas. Para isso, uma boa alternativa seria utilizar medidores inteligentes, os quais podem se comunicar com uma rede privada utilizando sinais de rádio para receber ou enviar informações. Neste cenário, pode-se listar alguns dos maiores fabricantes atualmente segundo a pesquisa da Intelligence (2024):

- Itron Inc.;
- Sensus USA Inc.;
- Sagemcom SAS;
- Wasion Group Limited; e
- Landis+Gyr Group AG.

Unindo todas estas tecnologias e especificações, capacidade de comunicação entre os equipamentos e juntamente com o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de demanda, que será composto por um algoritmo de tomada de decisão, pode-se consolidar uma solução original de gerenciamento dos carregadores de VEs em um edifício coletivo.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Baseando-se nos cenários atuais de projeção do aumento de consumo e uso de VEs, conseqüentemente seguido pelo aumento do uso de carregadores AC de uso residencial, este projeto de pesquisa focará especificamente em uma solução para gerenciamento deste tipo de carregadores em ambiente de uso coletivo, como

condomínios residenciais, garagens corporativas, *shoppings centers* e mercados por exemplo.

Para incluir na solução o gerenciamento de qualquer modelo de carregador, não será considerada uma comunicação direta com o dispositivo, mas sim com um equipamento que controle a alimentação deste. Portanto o controle de potência será considerado apenas como ligado (potência máxima do carregador) ou desligado. Deixando para projetos futuros a implementação da comunicação do sistema com cada modelo e seus protocolos de comunicação assim como a aplicação da curva de carga real dos dispositivos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho visa desenvolver uma solução de carregamento de veículos elétricos com gerenciamento de demanda máxima.

Para alcançar o objetivo geral, como objetivos específicos podem ser listados:

- Revisar as normas regulatórias nacionais e internacionais
- Revisar as normas regulatórias do estado do Paraná
- Avaliar a literatura técnico-científica no que concerne a:
 - Equacionamento de carga de baterias de veículos elétricos;
 - Sistemas de carregamento utilizados atualmente;
 - Sistemas de comunicação entre veículo, carregador e medidor de energia;
 - Métodos de otimização de carregamento;
- Desenvolver metodologia de gerenciamento de demanda máxima para carregamento de VEs;
- Avaliar tecnologias disponíveis no mercado que contribuam para a elaboração da solução;
- Testar a metodologia com diferentes valores de carga e modelos de carregadores;
- Analisar os resultados obtidos e avaliar se o algoritmo atende às necessidades.

1.3 JUSTIFICATIVA

Avaliando as tendências da mobilidade elétrica brasileira para os próximos anos, conforme exposto no início do presente capítulo, se faz necessário prever soluções para carregamento de VEs em edifícios residenciais, comerciais, garagem de frotas e demais modalidades de estacionamentos coletivos.

Estas soluções devem prever as diversas possibilidades de potência instalada, tipos da entrada de energia da unidade consumidora (mono, bi ou trifásica), possíveis modelos de carregadores disponíveis no mercado e as demais variáveis envolvidas, bem como suas interações e atendimento à demanda de projeto, possibilitando o gerenciamento das cargas envolvidas e ainda possibilitando uma otimização no custo da recarga, aproveitando-se de variações de tarifa horária quando houver.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O capítulo 1 apresenta o atual contexto do mercado de VEs no Brasil e no Mundo, destacando os objetivos e a definição do problema de pesquisa. No capítulo 2 é revisada a fundamentação teórica relevante para o projeto, como tipos de carregadores de veículos elétricos, métodos de gerenciamento de demanda, otimização de custos de energia e infraestrutura de carregamento de veículos elétricos em ambientes coletivos.

O capítulo 3 aborda a revisão de literatura, apresentando o processo de seleção dos artigos relacionados ao tema, análise dos trabalhos selecionados e onde este projeto em questão preenche lacunas da pesquisa de gerenciamento de demanda.

No capítulo 4 são descritos os materiais e métodos necessários para o desenvolvimento da pesquisa e da solução, abordando na parte de materiais: a infraestrutura predial do edifício utilizado, os tipos e modelos de carregadores de VEs, dados de carregamento de VEs, compiladores e linguagem de programação empregada. Já na parte de métodos é apresentado o fluxograma geral do sistema de gerenciamento de demanda, assim como o equacionamento envolvido.

No capítulo 5 são apresentados os cenários avaliados, assim como resultados em forma de tabela e gráficos. Também é apresentada uma discussão sobre os resultados obtidos em comparação com os resultados encontrados na literatura.

No capítulo 6 os objetivos iniciais são avaliados para obter as conclusões sobre os resultados e as expectativas, assim como a lista de possíveis pesquisas a serem feitas no futuro para dar continuidade no projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para desenvolver uma solução para um problema complexo como este, é necessário avaliar todos os pontos envolvidos, como os tipos de carregadores de veículos elétricos e suas variações, a infraestrutura necessária para a instalação destes carregadores, quais normas regem os ambientes coletivos onde estes serão instalados, quais são as otimizações de custos possíveis e quais os gerenciamentos de demanda já conhecidos que podem ser aplicados direta ou indiretamente na solução.

2.1 CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Estações de carregamento ou carregadores são basicamente os postos de abastecimento para veículos elétricos. O ponto de recarga normalmente é composto pela unidade de potência, que converte a energia de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) ou vice versa; pelo sistema de carregamento, responsável por gerenciar e monitorar os parâmetros durante a recarga; a interface de comunicação, que possibilita a comunicação entre o veículo e o carregador e o cabo de força que será conectado ao veículo (Mastoi et al., 2022).

De acordo com as suas características técnicas a SAE (Society of Automotive Engineers) e a IEC (International Electrotechnical Commission) categorizam os equipamentos conforme o tipo de recarga e sistema de segurança.

Tomando como referência a velocidade de recarga e conseqüentemente a potência entregue ao VE, chega-se à classificação por nível, a qual consistem em uma divisão em três grupos de acordo com as suas características técnicas, conforme detalhado na Figura 6.

Assim, pode-se listar as características principais de cada nível como:

- Nível 1: Utilizam 120 V CA para alimentação, com potência de saída de cerca de 1,44 kW, resultando em mais de um dia para carregar um VE pequeno;
- Nível 2: Utilizam 208-240 V CA para alimentação, com potência de saída entre 7 e 19 kW, conseguem carregar um veículo médio em uma noite;

- Nível 3: Carregadores rápidos CC: Utilizam 400 a 1000 V CC para alimentação, com potência de saída entre 50 e 350 kW, conseguem carregar baterias de 10 a 90% em menos de 30 minutos. Geralmente esses carregadores são utilizados em pontos públicos de recarga devido ao seu alto custo.

Figura 6: CLASSIFICAÇÃO DOS NÍVEIS CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3/Carregamento rápido CC |
|--|--|---|---|
| Tipo do conector carregador-veículo |  J1772 |  J1772 | CCS  CHAdEMO  Tesla  |
| Tensão de alimentação | 120 V CC | 208 - 240 V CA | 400 V - 1000 V CC |
| Corrente | 12 - 15 A | até 80A | até 500A |
| Potência de saída | ~1.4 kW | 7 kW - 19.2 kW | 50 - 350 kW |
| Tempo de carga total para veículos PHEV | 5 - 6 horas | 1 - 2 horas | N/A |
| Tempo de carga total para veículos BEV | 40 - 50 horas | 4 - 10 horas | 20 minutos - 1 hora |
| Alcance estimado por hora de recarga | 3-8 km | 16-32 km | 290-380 km |
| Uso típico | Residências | Residências, locais de trabalho, públicos | Públicos |

FONTE: Adaptado de U.S. Department of Transportation (2023)

Com o avanço da tecnologia de carregadores e VEs os carregadores Nível 1 estão caindo em desuso, sendo geralmente utilizados como alternativa de emergência para viagens ou situações onde não haja outro carregador mais potente disponível.

Já os equipamentos Nível 3 são as estações de carregamento públicas, que requerem uma infraestrutura elétrica específica de alta capacidade e têm custo muito elevado, o que torna inviável a instalação em prédios comerciais e residenciais.

Portanto, na maioria dos casos os proprietários de VE tendem a utilizar carregadores Nível 2, devido à sua capacidade de carga, custo de aquisição do

equipamento e compatibilidade com as instalações elétricas comumente disponíveis nos edifícios residenciais e comerciais (U.S. Department of Energy, 2018).

2.2 NORMAS VIGENTES

ABNT NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão

A ABNT NBR 5410:2004 é a norma brasileira que estabelece os requisitos para a instalação elétrica de baixa tensão, aplicável a edificações residenciais, comerciais, industriais e outras. Seu objetivo principal é garantir a segurança das pessoas e do patrimônio contra choques elétricos, sobrecargas, curtos-circuitos e outros riscos associados às instalações elétricas, além de assegurar o funcionamento adequado dos sistemas instalados (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004)

A norma abrange diversas diretrizes, como o dimensionamento de condutores, a escolha de materiais e equipamentos, e a instalação de dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis. Também especifica as condições para o aterramento e equipotencialização, fundamentais para evitar acidentes e preservar a eficiência do sistema elétrico. Além disso, define critérios para inspeções e manutenções, assegurando que a instalação permaneça segura ao longo do tempo.

Outro ponto é o controle de impactos ambientais e econômicos, promovendo práticas sustentáveis, a norma orienta para o uso racional de energia destacando a importância da eficiência energética, e considera aspectos como a segregação de circuitos e o dimensionamento correto para evitar perdas desnecessárias.

Por fim, a ABNT NBR 5410:2004 enfatiza também a importância da qualificação profissional para a execução e inspeção de instalações elétricas, onde os profissionais envolvidos devem seguir rigorosamente os padrões estabelecidos pela norma para garantir a conformidade e minimizar riscos, contribuindo para instalações mais seguras, eficientes e confiáveis.

A partir dessa norma que especifica de maneira geral uma instalação elétrica de baixa tensão, outras normas se baseiam nela e a complementam em aplicações específicas, como é o caso da NBR 17019:2022.

IEC 61851 – Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos

A IEC 61851 é uma norma internacional que define os requisitos técnicos e de segurança para sistemas de carregamento de veículos elétricos. Abrangendo desde a infraestrutura de recarga até os protocolos de comunicação entre o veículo e a estação de carregamento, a norma assegura a interoperabilidade e a segurança das operações.

A norma classifica os sistemas de carregamento em quatro modos:

- Modo 1: carregamento direto em tomadas domésticas comuns, sem proteção adicional;
- Modo 2: uso de tomadas comuns com proteção integrada ao cabo de carregamento;
- Modo 3: carregamento em estações dedicadas com comunicação direta entre veículo e carregador;
- Modo 4: carregamento rápido em CC com equipamentos de alta potência.

Ela também estabelece requisitos para proteção contra choques elétricos, sobrecargas, e falhas na comunicação entre o veículo e a estação. Além disso, orienta sobre a necessidade de dispositivos como disjuntores diferenciais e sistemas de aterramento para garantir a segurança dos usuários e da instalação.

Por fim, a norma especifica as condições para operação em diferentes ambientes, como locais residenciais e comerciais, e destaca a importância da compatibilidade com outros padrões, como os de conectores (IEC 62196). Sua aplicação é essencial para promover uma infraestrutura de recarga segura, eficiente e universalmente compatível.

ABNT NBR 17019:2022 - Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalações em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos

Baseada na IEC 60364-7-722:2018 e sendo um complemento à NBR 5410:2004, a ABNT NBR 17019:2022 trata das diretrizes para instalações elétricas de baixa tensão, abrangendo sistemas com tensões até 1.000 V em CA e 1.500 V em CC. A norma tem como objetivo principal assegurar a segurança das pessoas, dos animais e do patrimônio, além de promover o funcionamento eficiente e sustentável das instalações elétricas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

Ela estabelece requisitos técnicos para o projeto, execução, manutenção e ampliação dessas instalações, incluindo o dimensionamento correto dos condutores, a escolha de materiais adequados, e a instalação de dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis. Aspectos como a proteção contra choques elétricos, sobrecargas, curtos-circuitos e efeitos térmicos são abordados para garantir a conformidade com os padrões de segurança.

A norma também destaca a importância da equipotencialização e aterramento, essenciais para reduzir os riscos de choques elétricos e falhas nos sistemas. Além disso, fornece orientações sobre como minimizar interferências eletromagnéticas e melhorar a eficiência energética, contribuindo para a sustentabilidade e o uso racional da energia elétrica.

Outro ponto é que a ABNT NBR 17019:2022 enfatiza a necessidade de profissionais qualificados para projetar e executar as instalações, garantindo que os padrões sejam seguidos de forma rigorosa. Inspeções periódicas e a manutenção preventiva são requisitos fundamentais para manter a segurança e a funcionalidade das instalações ao longo do tempo.

IEC 60364-7-722:2018 – Instalações elétricas de baixa tensão – Requisitos para instalações específicas – veículos elétricos

Análoga à NBR5410, a IEC 60364-7-722:2018 é uma norma internacional que estabelece requisitos específicos para instalações elétricas dedicadas ao carregamento de veículos elétricos. Parte do conjunto de normas IEC 60364, ela foca em garantir a segurança e o desempenho das instalações, considerando as particularidades e riscos associados ao carregamento de veículos (International Electrotechnical Commission, 2018).

A norma aborda aspectos como o dimensionamento de circuitos, seleção de dispositivos de proteção, e o uso de conectores apropriados para carregadores de veículos elétricos. Também define as condições de segurança para evitar choques elétricos, sobretensões, e outras falhas que possam comprometer a operação segura do sistema.

Um ponto crucial da norma é a exigência de sistemas de proteção contra contatos diretos e indiretos, com dispositivos como disjuntores diferenciais (DRs) e aterramento adequado. Ela também prevê a segregação de circuitos específicos para o carregamento, evitando interferências com outras instalações elétricas do local.

Ela considera as diferentes modalidades de carregamento, incluindo modos lentos, rápidos e ultrarrápidos, bem como os requisitos de infraestrutura para atender às demandas de carregamento em locais residenciais, comerciais e públicos. A norma ainda sugere práticas para melhorar a eficiência energética e a integração com redes elétricas inteligentes.

Assim como as NBRs citadas anteriormente, a IEC 60364-7-722:2018 também reforça a necessidade de que as instalações sejam realizadas por profissionais qualificados e regularmente inspecionadas. Essas diretrizes ajudam a garantir um ambiente seguro e confiável para o carregamento de veículos elétricos, promovendo o uso sustentável e a adoção crescente dessa tecnologia.

IEC 60309 – Plugues e tomadas para uso industrial

A IEC 60309 é uma norma internacional que define os requisitos para plugues, tomadas e conectores utilizados em aplicações industriais e específicas, como camping, carregamento de veículos elétricos e eventos temporários. Essa norma visa garantir a segurança e a interoperabilidade dos sistemas elétricos, estabelecendo padrões para dispositivos que suportam tensões de até 1.000 V e correntes de até 800 A.

Os dispositivos regulamentados pela IEC 60309 são projetados para operar em ambientes desafiadores, como áreas externas ou industriais, e por isso possuem características como resistência à água, poeira e impactos. A norma classifica os dispositivos por cor, para indicar a tensão e a frequência associadas, facilitando a identificação e evitando conexões inadequadas ou perigosas.

A norma também padroniza os formatos de plugues e tomadas para garantir a compatibilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. Os dispositivos possuem pinos e contatos dispostos de maneira específica para cada aplicação, reduzindo os riscos de falhas elétricas ou mau funcionamento.

Além da segurança elétrica, a IEC 60309 destaca a durabilidade e a confiabilidade dos dispositivos, especificando requisitos de resistência mecânica e ciclos de vida úteis elevados. Essa padronização promove a eficiência e a segurança em diversas aplicações, sendo amplamente adotada em setores como transporte, construção e mobilidade elétrica.

NBR IEC 62196-1:2021 - Plugues, tomadas, tomadas móveis para veículo elétrico e plugues fixos para veículos elétricos - Recarga condutiva para veículos elétricos;

A NBR IEC 62196-1:2021 é uma norma brasileira que estabelece os requisitos gerais para plugues, tomadas, conectores de veículos e entradas de veículos utilizados na recarga condutiva de veículos elétricos. Ela abrange acessórios destinados a sistemas de recarga com tensões nominais de até 690 V em CA e até 1.500 V em CC, com correntes nominais que não excedam 250 A para CA e 400 A para CC.

A norma especifica os requisitos mecânicos, elétricos e de desempenho desses acessórios, assegurando a compatibilidade e a segurança na interface entre os equipamentos de recarga e os veículos elétricos. Isso inclui diretrizes sobre materiais, construção, dimensões e testes necessários para garantir a confiabilidade e a interoperabilidade dos componentes utilizados no processo de recarga.

Além disso, a NBR IEC 62196-1:2021 proíbe o uso de cordões prolongadores nesses sistemas, enfatizando que os acessórios devem ser projetados para impedir tal utilização. A conformidade com esta norma é fundamental para o desenvolvimento seguro e eficiente da infraestrutura de recarga de veículos elétricos, promovendo a adoção crescente dessa tecnologia no Brasil.

NTC 902210 Copel – Sistemas de Recarga de VE

Elaborada pela Companhia Paranaense de Energia (Copel), a NTC 902210 é uma norma técnica que define os padrões para o fornecimento de energia elétrica a estações de recarga de veículos elétricos na área de concessão da Copel Distribuição. Seu principal objetivo é assegurar que as instalações de recarga sejam realizadas de

maneira segura e eficiente, atendendo aos requisitos técnicos necessários para a integração adequada com a rede elétrica existente.

Detalha os procedimentos a serem seguidos quando uma nova ligação elétrica é solicitada para uma estação de recarga, isso inclui critérios para a seleção de equipamentos, especificações técnicas para a instalação, e medidas de segurança que devem ser adotadas para proteger tanto os usuários quanto a infraestrutura elétrica.

Além disso, a NTC 902210 estabelece as condições para o fornecimento de energia elétrica, definindo parâmetros como a capacidade de carga, tipos de conectores permitidos e requisitos de compatibilidade com diferentes modelos de veículos elétricos. Essas diretrizes visam padronizar as instalações e garantir a interoperabilidade entre os diversos sistemas de recarga.

Também enfatiza a importância de seguir as regulamentações vigentes e as melhores práticas internacionais, como as estabelecidas pela IEC 61851, para assegurar a qualidade e a segurança das instalações. Isso inclui a implementação de dispositivos de proteção e a realização de inspeções periódicas para manter a integridade do sistema de recarga.

Em resumo, a NTC 902210 serve como um guia abrangente para a instalação e operação de estações de recarga de veículos elétricos na área de concessão da Copel Distribuição, promovendo a adoção segura e eficiente dessa tecnologia emergente e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da mobilidade elétrica na região.

2.3 INFRAESTRUTURA ELÉTRICA PARA CARREGAMENTO DE VES

Para a instalação de carregadores de VEs, mesmo sendo modelos residenciais e de potência média (até 22 kW), previamente deve-se avaliar alguns pontos da infraestrutura elétrica do local, como capacidade, situação da instalação elétrica e sistemas de segurança.

2.3.1 Avaliação da Capacidade da Rede Elétrica Local

Antes de instalar um carregador residencial, é essencial avaliar a capacidade da rede elétrica disponível na residência, isso inclui verificar se o padrão de entrada (ex.:

monofásico, bifásico ou trifásico) suporta a demanda adicional do carregador, se a potência instalada total está de acordo com a entrada de energia instalada pela concessionária e demais detalhes.

2.3.2 Quadro Elétrico

O quadro de distribuição deve ser avaliado para assegurar que possui espaço físico e capacidade elétrica para acomodar o circuito dedicado do carregador, caso contrário, pode ser necessário ampliá-lo ou instalar um quadro adicional dedicado ao novo circuito.

A instalação de um circuito exclusivo para o carregador é obrigatória de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) esse circuito deve incluir condutores, disjuntores, plugues e conectores dimensionados adequadamente, evitando que seja compartilhado com outras atividades.

Para proteger o circuito do carregador contra curtos-circuitos e sobrecargas elétricas é necessário instalar um disjuntor no quadro de distribuição. Esse disjuntor deve ser dimensionado baseado na potência nominal do carregador e na especificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004).

Assim como o disjuntor do circuito dedicado para o carregador, para a proteção contra choques elétricos requer a instalação de um DR, geralmente do tipo A ou tipo B, de acordo com o modelo do carregador. Esse dispositivo detecta correntes de fuga e desativa o circuito em caso de anomalias, evitando acidentes e protegendo o usuário.

O sistema de aterramento do sistema elétrico do local deve ser verificado ou instalado caso ainda não exista, garantindo que a instalação esteja dentro dos padrões normativos. O aterramento, juntamente com o DR, reduz o risco de choques elétricos e protege os equipamentos contra surtos de tensão.

Além dos sistemas de aterramento e DR, outro item importante para proteger o carregador e outros equipamentos conectados à rede é o dispositivo de proteção contra surtos (DPS), que também deve ser instalado no quadro de distribuição.

Os condutores elétricos que conectam o carregador ao quadro de distribuição devem ser dimensionados de acordo com as especificações de corrente e potência

nominais, assim como a distância do quadro ao equipamento, minimizando problemas de quedas de tensão, superaquecimento dos condutores ou gastos desnecessários.

2.3.3 Compatibilidade com o Carregador

Os carregadores possuem diferentes modos de operação (ex.: modo 2 ou modo 3, conforme a norma IEC 6185), portanto a infraestrutura elétrica deve atender o modelo do carregador, capacidade, conector, sistemas de segurança e demais especificações técnicas do fabricante.

Conforme dados da Car and Driver (2024a), nota-se uma tendência nas especificações de alimentação dos modelos mais vendidos dos Estados Unidos até 2024, sendo 208-240 Volts e entre 32 e 40 Amperes os valores mais comuns, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7: COMPARAÇÃO DOS CARREGADORES DE VES MAIS VENDIDOS (EUA)

| Modelo do carregador | Fabricante | Potência de saída máxima | Tensão de entrada | Corrente de saída | Tipo | Conector entrada | Padrão de entrada |
|------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------|---------|------------------|-------------------|
| Home Flex | ChargePoint | 12 kW | 208-240 V | 16A, 24A, 32A, 40A, 48A, 50A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2, Ground |
| 48 Amp Level 2 EV charger | Emporia | 11.5 kW | 208-240 V | 40A, 48A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2, Ground |
| Universal Wall Connector | Tesla | 11.5 kW | 200-240 V | 12A, 16A, 24A, 32A, 40A, 48A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2/N, Ground |
| 40 Smart EV Charging Station | JuiceBox | 4.4-9.6 kW | 110-240 V | 40A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2, Ground |
| 32 Amp EV charger | Lectron | 7.68 kW | 110-240 V | 32A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2/N, Ground |
| Smart Connect EV charger | Grizzl-E | 9.6 kW | 208-240 V | 16, 24, 32, 40A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2, Ground |
| HomeStation EV Charger | Electrify America | 9.6 kW | 208-240 V | 16, 32, 40A | Level 2 | NEMA 14-50 | L1, L2, Ground |

FONTE: Adaptado de Car and Driver (2024b)

Além da tendência em valores de alimentação, outro ponto a se destacar é a utilização do conector de alimentação NEMA 14-50 nos EUA, este padrão contempla pino terra e até outros três pinos para fase, comumente utilizado no padrão bifásico 240 V e suporta até 50 A, totalizando 12 kW de potência máxima, conforme indicado no Figura 8.

Figura 10: DETALHE DAS CONEXÕES DE ALIMENTAÇÃO DOS CARREGADORES



FONTE: Zeeda Energy (2022)

Caso o carregador seja instalado em um ambiente fechado, como uma garagem, é importante garantir que o local tenha ventilação adequada, visto que para determinados modelos de conjunto carregador-bateria deve-se atentar se há aquecimento que necessite de ventilação.

Quando possível e/ou necessário, é importante considerar o aumento de veículos elétricos na residência, assim deve-se prever um dimensionando da infraestrutura elétrica para suportar a instalação de um segundo carregador ou ainda a recarga de veículos com maior potência.

Com o aumento nas instalações de energias renováveis em residências, condomínios e edifícios comerciais, caso na instalação hajam painéis solares ou outros sistemas de energia renovável, a instalação deve ser planejada para contemplar e otimizar o uso dessa energia gerada localmente, reduzindo custos e promovendo sustentabilidade.

Após a realização de projeto e instalação do carregador, é fundamental prever um plano de manutenção periódica para a infraestrutura elétrica, garantindo a longevidade e o desempenho do sistema, além de atualizá-lo caso novas tecnologias sejam incorporadas no futuro, como carregadores mais rápidos, mais potentes ou ainda mais eficientes.

2.4 OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS

Recomendada pela NTC 902210 da COPEL (2022a), a otimização de custos é um ponto que deve ser cada vez mais explorado tanto pelos usuários de VEs, utilizando-se carregadores mais simples preferencialmente nos horários de menor tarifa, quanto pelos fabricantes de carregadores, implementando em seus produtos sistemas de controle de carregamento com agendamento ou automação para utilização nos horários que gerem menor custo para o usuário.

Além de usufruir da variação da tarifa horária, outra possibilidade para otimizar custos é aderir ao mercado livre de energia, ou seja, comprar ou vender energia de acordo com a necessidade, sistema que na Europa já permite unidades consumidoras residenciais comercializar energia livremente desde 2007, e atualmente no Brasil está em etapas iniciais de liberação para consumidores do grupo B (carga abaixo de 500 kW) segundo o Mercado Livre de Energia Elétrica (2023).

Porém, juntamente com a otimização de custos outro fator trivial para que isso ocorra é o gerenciamento de demanda, onde por meios como agendamentos de recarga, automações e análises de dados a otimização dos custos pode ser alcançada de maneira eficaz.

2.5 GERENCIAMENTO DE DEMANDA

O gerenciamento de demanda de energia elétrica é uma prática importante para empresas e consumidores que buscam otimizar o uso de energia e reduzir custos, pois visa controlar o consumo de energia em horários de pico, quando os preços costumam ser mais altos e a rede elétrica está sobrecarregada. Além disso, é uma estratégia essencial para reduzir custos operacionais e contribuir para a sustentabilidade ambiental (Ingrid Dantas, 2024).

Em ambientes compartilhados como edifícios comerciais, condomínios residenciais, shoppings e outros, o gerenciamento de demanda sugerido pela Copel (2022b) e demais concessionárias de energia devem ser avaliados, visto que em horários

de pico de demanda simultânea as instalações prediais e de distribuição podem ser afetadas.

Para viabilizar o gerenciamento de demanda, pode-se adotar algumas abordagens, como o uso de análise de dados e inteligência artificial, otimização e programação de uso, tecnologias de armazenamento e geração distribuída, entre outros.

2.5.1 Análise de dados

A análise de dados é essencial para o gerenciamento da demanda de energia elétrica, pois permite monitorar o consumo em tempo real e prever padrões de uso. Com grandes quantidades de informações e sensores as concessionárias podem antecipar picos de demanda, otimizar a alocação de recursos e implementar estratégias de resposta à demanda. Isso possibilita um fornecimento mais eficiente, evitando desperdícios e reduzindo custos operacionais tanto para fornecedores quanto para consumidores.

Além disso, a análise de dados facilita a integração de fontes renováveis, como solar e eólica, tornando o sistema energético mais sustentável e seguro. Ao compreender melhor a demanda, as concessionárias podem reduzir a dependência de fontes fósseis e garantir maior estabilidade no fornecimento. Assim, o uso inteligente dos dados contribui para um sistema mais flexível, econômico e alinhado com as necessidades futuras da sociedade.

2.5.2 Inteligência artificial

A aplicação da inteligência artificial (IA) em um sistema de gerenciamento de demanda permite otimizar o consumo e a distribuição de energia por meio da análise preditiva e automação. Com algoritmos avançados e um banco de dados históricos a IA pode identificar padrões de uso, prever picos de demanda e ajustar automaticamente a alocação de recursos, evitando sobrecargas na rede e reduzindo desperdícios. Além disso, permite a implementação de tarifas dinâmicas e estratégias de resposta à demanda, incentivando consumidores a utilizarem energia de forma mais eficiente e econômica.

Assim como a análise de dados, a IA pode viabilizar a automação na tomada de decisão na integração de energias renováveis, e ao prever variações na geração dessas fontes e equilibrá-las com a demanda contribui para um fornecimento mais estável e sustentável.

2.5.3 Programação de demanda

Como primeira etapa no gerenciamento de demanda residencial por exemplo, a programação da demanda pode otimizar a utilização do consumo de energia, alocando recargas para horários em que haja mais potência instalada disponível para a utilização, viabilizando a recarga sem afetar o consumo cotidiano.

2.5.4 Armazenamento de energia

Em estações de recarga em locais isolados, possivelmente alimentadas por energias renováveis *off grid*, o armazenamento de energia em bancos de baterias deve ser utilizado a fim de gerar uma reserva de energia disponível no momento em que seja demandada, e, enquanto a recarga do veículo ocorre. A geração de energia renovável é utilizada para recarregar este banco, sempre tendo um *buffer* de energia disponível para uso imediato.

2.5.5 Geração distribuída

A geração distribuída representa uma transformação fundamental no gerenciamento da demanda de energia elétrica, permitindo que consumidores gerem sua própria energia através de fontes renováveis, como painéis solares e pequenas centrais eólicas, próximo aos pontos de consumo. Esta abordagem descentralizada não apenas reduz a dependência da rede centralizada, mas também contribui para a estabilidade do sistema elétrico, permitindo melhor distribuição da carga e redução das perdas de transmissão, além de proporcionar maior resiliência durante picos de demanda ou falhas no sistema principal.

Quando integrada a um sistema de gerenciamento de demanda, a geração distribuída possibilita uma otimização mais eficiente do consumo energético, criando um ambiente onde a energia pode ser gerada, armazenada e consumida de forma

inteligente, adaptando-se às necessidades específicas de cada localidade. Este modelo também favorece a sustentabilidade ambiental e a eficiência econômica, pois reduz a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura de transmissão e distribuição, além de diminuir a emissão de gases de efeito estufa ao priorizar fontes renováveis de energia, resultando em um sistema elétrico mais moderno, flexível e preparado para as demandas futuras.

2.6 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO NSGA-III

O NSGA-III (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm III*) é um algoritmo avançado de otimização multiobjetivo, desenvolvido como uma evolução do NSGA-II, especialmente projetado para lidar com problemas que envolvem múltiplos objetivos conflitantes (três ou mais). Este algoritmo utiliza princípios inspirados na evolução natural, começando com um conjunto de soluções aleatórias e melhorando-as gradualmente através de sucessivas gerações, aplicando operações como seleção, cruzamento e mutação.

O diferencial do NSGA-III está em seu mecanismo de seleção de soluções, que utiliza uma abordagem baseada em pontos de referência distribuídos uniformemente no espaço dos objetivos, em vez da distância de aglomeração usada no NSGA-II. Esta característica torna o algoritmo particularmente eficaz em problemas com muitos objetivos, onde métodos mais simples tendem a perder eficiência. O processo envolve associar cada solução ao ponto de referência mais próximo e selecionar as soluções de forma que cada ponto tenha uma representação equilibrada na próxima geração.

O algoritmo se destaca pela sua capacidade de lidar com restrições e adaptabilidade a diferentes tipos de problemas, sejam eles contínuos ou discretos. Na prática, é amplamente utilizado em diversos campos, como engenharia para otimização de projetos, economia para balancear diferentes métricas financeiras, e logística para planejamento de rotas considerando múltiplos fatores como tempo, custo e impacto ambiental.

Esse algoritmo não garante encontrar a solução ótima global, mas fornece uma aproximação robusta da fronteira de Pareto, representando os melhores compromissos

possíveis entre os múltiplos objetivos em consideração. Portanto, é um bom candidato para o processo de otimização do problema descrito neste trabalho.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Assim, tendo revisado a base de conhecimento para o desenvolvimento do estudo, pode-se partir para a revisão da literatura acadêmica pertinente, avaliando como cada autor propôs soluções relacionadas ao carregamento de VEs, quais foram os problemas encontrados por eles e como esses estudos podem contribuir para o desenvolvimento da solução do presente trabalho.

Este é um campo de estudo recente e tem variáveis regionais, portanto além de não existir uma solução única que resolva todas as demandas, as soluções podem ter características relacionadas à região às quais foram submetidos os estudos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste projeto, são avaliadas as metodologias de gerenciamento de demanda existentes no Brasil e no exterior, juntamente com as soluções de otimização de custos de recarga de VEs já utilizadas ao redor do mundo.

Para a elaboração deste trabalho é essencial o levantamento da literatura especializada de publicações internacionais e nacionais, as normas vigentes, bem como revisão dos projetos relacionados ao assunto. Assim, a divisão de abordagens das pesquisas especializadas recentes pode ser feita em:

- Rede de distribuição
- Energias renováveis
- Utilização de algoritmos para otimização de recarga
- Outras abordagens relevantes.

3.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Como alternativa aos picos de demanda, a utilização de energias renováveis aliadas a armazenamento temporário de energia também tem seu espaço nas pesquisas. Dentre os exemplos de sistemas de gerenciamento de demanda já estudados, pode-se citar o desenvolvido na Università degli Studi di Brescia, na Itália (Andrenacci et al., 2023), onde a metodologia utilizada contava com o mapeamento do tempo médio de estadia dos veículos no campus da universidade, carregadores nível 2, utilização de painéis fotovoltaicos, estudo da incidência solar para geração e armazenamento temporário de energia em banco de baterias, otimizando assim os custos de recarga.

Este estudo se mostrou bem completo e com um cenário semelhante aos mencionados anteriormente, porém levou em consideração a existência de um sistema de suporte, composto pelos painéis fotovoltaicos e pelas baterias da estação de carregamento, para atender a demanda no período de carregamento.

A metodologia contou com um sistema preditivo, baseando-se em um histórico de permanência dos veículos e previsão do tempo, assim, com um dia de antecedência o banco de baterias deveria estar carregando, utilizando a energia fotovoltaica, para

antecipar a carga necessária para atender o próximo pico, garantindo assim a melhor eficiência financeira da solução.

O estudo enfatiza que as estratégias preditivas baseadas em dados históricos e estatísticos superam a performance de estratégias reativas no quesito de eficiência de custos e estabilidade da rede. A integração do sistema fotovoltaico e do banco de baterias reduziu a dependência da rede de distribuição em até 50% nos horários de pico, porém a limitação do sistema se apresentou na degradação das baterias.

Utilizando-se de uma abordagem semelhante, Mahmud et al. (2019) também desenvolveram um trabalho no qual além de VEs, banco de baterias e energia fotovoltaica, foi incluído também a tecnologia bidirecional V2G, ajudando a reduzir o pico de consumo e diminuir os custos energéticos dos estabelecimentos comerciais.

A metodologia inclui o desenvolvimento de algoritmos de controle e planejamento de carga que sincronizam o uso da energia solar, dos VEs e das baterias, aumentando a eficiência e a sustentabilidade do sistema. Testes realizados em uma rede real na Austrália mostraram que essa abordagem consegue reduzir a carga de pico em até 50%, além de diminuir os custos energéticos em até 27,3%, além de melhorar o fator de carga em 9%.

A análise de incertezas revelou que o sistema mantém uma boa eficiência mesmo com variações de 10% na carga, demonstrando robustez frente às mudanças no consumo. A integração conjunta de painéis fotovoltaicos, VEs e baterias se mostrou mais eficaz do que o uso isolado de cada fonte, contribuindo significativamente para o gerenciamento flexível e sustentável da energia em ambientes comerciais de grande porte, como shoppings, hospitais e escolas.

Por outro lado, Karmaker et al. (2023) propõem a utilização de um algoritmo de gerenciamento em um sistema com energia solar e geradores à base de biogás para dar suporte à rede de distribuição em Bangladesh. Esse algoritmo leva em consideração a energia gerada, a energia consumida pelos VEs, períodos de carga e tarifas de recarga, a fim de atingir uma solução eficiente economicamente e mitigar impactos ambientais.

O sistema considera as limitações de depender apenas da energia solar, que está disponível apenas por algumas horas por dia, integrando o biogás como uma fonte

de energia complementar. Essa hibridização garante um fornecimento de energia mais confiável e contínuo para o carregamento de VEs.

Os resultados demonstram que o algoritmo proposto reduz significativamente os custos de energia, alcançando uma redução de 74,67% em comparação com as tarifas fixas existentes. Essa redução de custo torna o carregamento de VEs mais acessível para os usuários, incentivando a adoção dessa tecnologia. O estudo conclui que a aplicação de energias renováveis *off-grid* tem grande potencial de auxiliar o impacto gerado por carregadores de VEs na rede de distribuição, além de contribuir com a redução de gases de efeito estufa.

Em conclusão, o artigo demonstra a eficácia de um sistema de gerenciamento de energia baseado em lógica *fuzzy* para uma estação de carregamento híbrida baseada em energia renovável. O algoritmo proposto otimiza o uso de energia, reduz custos e minimiza o impacto ambiental. Os resultados sugerem que tais sistemas são uma solução promissora para promover a adoção de VEs e criar uma infraestrutura de transporte sustentável, particularmente em países em desenvolvimento com abundantes recursos de energia renovável.

3.2 UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS PARA OTIMIZAÇÃO DE RECARGA

Com relação a agendamentos de recarga, um ponto levantado por alguns autores é a utilização de algoritmos e dados estatísticos, a fim de tentar prever a demanda a ser utilizada e evitar sobrecargas na rede.

Como um exemplo da aplicação do NSGA-III para otimização de recarga e agendamentos, Li et al. (2022) propõem um método de otimização multiobjetivo para um sistema centralizado de recarga com substituição imediata de módulos de baterias (solução comum na China) baseado em um sistema de recarga alimentado pela rede de distribuição e por painéis fotovoltaicos, com o objetivo de melhorar a eficiência econômica do processo de recarga e também mitigar os efeitos adversos na rede elétrica.

Para extrair o melhor dessa solução, os autores desenvolveram um modelo de programação de otimização multiobjetivo, utilizando o NSGA-III, que simultaneamente

minimiza o custo total de operação e suaviza as flutuações de carga, contribuindo assim para a estabilidade da rede e otimizando custos.

O sistema centralizado de recarga e troca de baterias (CBCS) é projetado para fornecer serviços de recarga para baterias de veículos elétricos através de uma rede envolvendo estações centralizadas de recarga de baterias e estações de troca de baterias (BSSs). O CBCS fornece serviços de recarga para baterias descarregadas (DBs), transformando-as em baterias totalmente carregadas (FCBs) que são então enviadas para as BSSs. As BSSs então trocam essas FCBs para os usuários de EVs, recebendo DBs em retorno, que são subsequentemente enviadas de volta ao CBCS para recarga. Este sistema integra o fluxo de baterias, fluxo de energia (incluindo energia solar e eletricidade da rede elétrica), e fluxo de informações para gerenciar a recarga de baterias, demandas de troca, e informações de carga, visando melhorar a conveniência e eficiência da recarga de VEs enquanto considera a integração de fontes de energia renovável como fotovoltaica (PV).

Utilizando o conceito de Internet de Energia (do inglês EI), onde a rede elétrica é tratada como um sistema digital e a energia ser gerada, distribuída e consumida de forma mais eficiente e flexível, Hua et al. (2024) propõe em seu trabalho uma estratégia de roteamento de energia baseada no fluxo de emissão de carbono, visando reduzir simultaneamente as perdas de energia e as emissões de carbono em sistemas regionais. A abordagem combina técnicas de teoria dos grafos, utilizando busca em profundidade (DFS) para encontrar caminhos de transmissão, com um algoritmo genético aprimorado, o U-NSGA-III (versão aprimorada do NSGA-III), para obter soluções de Pareto ótimas que equilibram esses dois objetivos. A estratégia considera cenários complexos de múltiplas fontes, múltiplas cargas e múltiplos caminhos, oferecendo maior flexibilidade na operação do sistema energético.

As perdas de energia nos componentes e as emissões de carbono são calculadas com base na capacidade, resistência, eficiência e na intensidade de carbono associada a diferentes fontes de energia. A formulação do problema de otimização visa minimizar as perdas de energia e as emissões, respeitando restrições de capacidade dos geradores e linhas, garantindo uma operação segura e eficiente do sistema.

A estratégia proposta envolve etapas que incluem a determinação de prioridades de carga, identificação de combinações viáveis de fontes de energia e busca por caminhos eficientes usando DFS. O algoritmo U-NSGA-III é utilizado para determinar as saídas dos geradores e selecionar as soluções ótimas de Pareto, que oferecem um compromisso entre redução de perdas e emissões.

O estudo concluiu que a estratégia de roteamento de energia proposta consegue reduzir efetivamente as perdas de energia e as emissões de carbono em um cenário de EI regional, com resultados de redução das perdas de energia em 12,04% e das emissões de carbono em 38,43% em relação a uma estratégia de roteamento existente.

Outra aplicação do algoritmo genético NSGA-III aparece na pesquisa de Zhao et al. (2024), na qual tem-se o objetivo de otimizar a localização e a distribuição de estações de carregamento buscando um equilíbrio entre custo, resiliência e conectividade dessa rede. Foi utilizado um modelo de rede tipo “mundo pequeno”, que visa reduzir o tempo de deslocamento e congestionamento entre as estações.

O algoritmo NSGA-III é empregado para tratar o problema como uma otimização multiobjetivo, permitindo a busca por soluções que minimizem custos enquanto maximizam a robustez e conectividade da rede. Essa abordagem impulsiona a criação de redes mais eficientes, adaptáveis e capazes de garantir um serviço de alta qualidade, mesmo em condições de estresse ou falhas pontuais.

Por fim, os estudos de caso e simulações realizados demonstram que a aplicação dessa metodologia melhora significativamente a eficiência operacional e a resiliência das redes de carregamento de VE. Os resultados mostram reduções no tempo de viagem, maior cobertura das áreas urbanas e uma infraestrutura mais sustentável e preparada para o futuro.

Tabela 1: RESUMO DA LITERATURA

| Estudo | Pontos de destaque |
|--------------------------|---|
| Andrenacci et al. (2023) | Avaliação do tempo de permanência dos veículos na universidade; Utilização de energia solar e banco de baterias; |

| | |
|------------------------|---|
| | Objetivo de contornar horários de pico sem afetar o carregamento dos VEs. |
| Mahmud et al. (2019) | Utilização de energia solar e banco de baterias; Utilização do sistema V2G para contornar impactos do horário de pico. |
| Karmaker et al. (2023) | Utilização de energia solar e geradores à base de biogás; Aproveitamento da incidência solar e material biodegradável descartado no país. |
| Li et al. (2022) | Sistema de recarga com troca de baterias; Otimização do carregamento do estoque de baterias através de NSGA-III; Utilização de energia solar para contornar horários de pico. |
| Hua et al. (2024) | Utilização do conceito de internet de energia; Otimização de rotas para pontos de recarga; Aplicação do NSGA-III como otimização. |
| Zhao et al. (2024) | Utilização do NSGA-III para otimização de distribuição de estações de carregamento; Otimização de custos; Conectividade na rede de recarga. |

Fonte: o Autor (2025)

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando-se os trabalhos listados, percebe-se que há diversas maneiras de abordar o problema de recarga de VEs, muitas vezes tendo a adição de variáveis locais como incidência solar, instabilidade da rede de distribuição ou ainda a possibilidade de trocar a bateria do veículo por uma bateria recarregada.

Portanto, pode-se dizer que a variável em que se deseja focar neste presente estudo é a demanda contratada, visto que isso seria o principal limitador para a implementação de um sistema de recarga em situações onde não havia este objetivo no momento da concepção do projeto elétrico.

Com as soluções estudadas e tecnologias disponíveis, foi elaborado um algoritmo para gerenciamento da demanda de carregadores de VEs com otimização através do algoritmo genético NSGA-III, visando o melhor aproveitamento da demanda contratada junto à concessionária de energia.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos que orientaram esta pesquisa, descrevendo o percurso científico adotado para alcançar os objetivos propostos. São apresentados a caracterização da pesquisa, os métodos e técnicas utilizadas, bem como os critérios estabelecidos para garantir o rigor científico do estudo. A metodologia foi estruturada de modo a responder à questão principal da pesquisa: como gerenciar a demanda de diversos carregadores de VEs em um edifício e atender aos objetivos geral e específicos delimitados no capítulo introdutório.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada com abordagem qualitativa e quantitativa, uma vez que busca gerar conhecimentos direcionados à solução de problemas específicos da utilização de VEs na infraestrutura urbana atual, combinando análises estatísticas com interpretações aprofundadas dos fenômenos observados.

Quanto aos objetivos, classifica-se como exploratória por se tratar de análise de cenários que exemplificam o problema a ser solucionado. Em relação aos procedimentos técnicos, foram adotados os seguintes procedimentos técnicos:

- a) Pesquisa bibliográfica: baseando-se nas palavras chave, procurou-se os trabalhos mais recentes na área, considerando em geral os últimos 10 anos, em revistas e conferências de expressão A1 ou A2, avaliando também as tecnologias utilizadas e trabalhos que pudessem agregar em relevância científica para o resultado deste trabalho;
- b) Estudo de caso: para este trabalho foi considerado como referência o cenário de um condomínio na cidade de Curitiba, o qual apesar de ter sido construído a poucos anos não previu em seu projeto a adaptação para uma demanda de VEs em sua garagem, exemplificando a necessidade de uma solução conforme a proposta neste trabalho.

O estudo foi realizado procurando uma solução viável para edifícios já construídos, visando evitar o impacto financeiro com relação às ampliações de demanda contratada e às alterações elétricas na infraestrutura existente para suportar esta nova demanda, trazendo assim a solução ótima no quesito econômico e de viabilidade técnica.

Este cenário foi limitado considerando-se que atendendo estas demandas a solução terá flexibilidade suficiente para atender quaisquer projetos de novos edifícios.

4.2 UNIVERSO DE PESQUISA E AMOSTRAGEM

4.2.1 Delimitação do campo de pesquisa

Pensando na aplicabilidade deste modelo como uma solução para mercado, não foram consideradas fontes de energia renovável ou bancos de baterias como nos trabalhos citados na revisão bibliográfica. Este estudo se limita apenas a utilizar de maneira mais eficiente a capacidade da instalação elétrica de edifícios existentes sem que se ultrapasse o valor da demanda contratada, valor esse já disponibilizado pela companhia de distribuição de energia.

Neste estudo também foram considerados cenários simplificados, visto o objetivo de testar a aplicação da otimização e do sistema como um todo. Para este estudo não foi considerada uma comunicação entre o sistema de controle e o carregador, conseqüentemente o controle da potência entregue ao veículo, feito pelo carregador, não foi considerado como uma variável controlável, sendo assim o valor de potência entregue pelo carregador foi considerado como a potência nominal do carregador. Assim, quando um carregador é conectado a um VE tendo potência disponível para uso, para fins de cálculo o algoritmo considera o uso total da potência do carregador.

4.2.2 Estrutura considerada

a) Infraestrutura do edifício

Neste trabalho será considerado um modelo de sistema de recarga G2V (rede-veículo), sem utilização das baterias dos VEs como retorno para a rede e também sem a geração local de energia elétrica. O estudo levará em consideração a rede elétrica apenas a partir da entrada de energia do edifício.

Diante disto, este estudo tem como alvo os edifícios residenciais e comerciais com diversas garagens, que possam ter a necessidade de carregar VEs a qualquer horário do dia sem atingir a capacidade máxima da instalação elétrica projetada, limitada pela demanda contratada.

Para a estimativa deste estudo levantou-se a potência instalada média para um apartamento residencial e, a partir deste dado, pode-se estimar a potência máxima instalada em um condomínio. Baseando-se em um exemplo de cálculo de demanda feito pela ENEL (2019), para um condomínio com 138 apartamentos iguais de 90 m², considerando a demanda para uso das áreas comuns, aparelhos de ar condicionado e o fator de diversificação da carga, a demanda estimada para este edifício seria de cerca de 300kVA.

Assim, considerando a projeção da International Energy Agency (2024b) de que até 2030 os VEs serão aproximadamente 40% do mercado de novos veículos, tem-se que avaliar que cerca de 55 apartamentos podem necessitar utilizar o sistema de recargas no condomínio, sendo o pior cenário em que todos os veículos queiram carregar ao mesmo tempo.

Portanto, a solução deve contemplar a melhor utilização da demanda contratada para atingir este objetivo.

b) Carregadores de veículos elétricos

Neste trabalho foram considerados três tipos de carregadores, baseando-se nos modelos anteriormente listados na Figura 9, sendo todos eles próximos à modelos residenciais e já comercializados no mercado. Sendo eles com potências de 3,6 kW, 7 kW e 22 kW.

Com essas três opções disponíveis, o usuário pode escolher qual o atende melhor no momento, dada a prioridade, necessidade do tipo de carga, ou ainda, a disponibilidade do sistema naquele momento diante do limite de demanda contratada.

c) Dados de carregamento de VEs

Para este estudo está sendo considerado um padrão de carregamento linear, não realista, onde o carregador entrega a potência máxima durante todo o período do

carregamento. Portanto, para exemplificação, a partir do momento em que um carregador de 7kW seja conectado, este consumirá 7kWh até que o carregamento do VE esteja completo.

Em relação às inúmeras variedades de VEs no mercado e das diversificadas capacidades de armazenamento e bateria dos mesmos, foram consideradas neste estudo três capacidades de baterias de VEs para simulação, respectivamente para os carregadores de 3,6 kW, 7 kW e 22 kW, sendo elas:

- Carga lenta: capacidade de 10 kWh
- Carga Semi-rápida: potência capacidade de 50 kWh
- Carga Rápida: capacidade de 50 kWh

Para fins de cálculo, foram consideradas cargas completas nas baterias dos VEs, ou seja, de 0 a 100%, com a condição de que o carregamento só inicia se for possível atingir 100% sem extrapolar a potência total instalada especificada no item 4.3.2.a e sem ultrapassar o limite de demanda contratada. Em complemento, tem-se entendimento de que essa condição em um cenário real compreenderia o intervalo de 10 a 80% da capacidade da bateria, pois fora desse intervalo o carregamento apresenta maior divergência de comportamento.

d) Compiladores e linguagem de programação empregada

O trabalho foi desenvolvido em linguagem de programação Python, visto sua flexibilidade e facilidade para implementação da programação. Além disso, apresenta possibilidade de utilizar compiladores de código livre, como o Spyder, que na mesma ferramenta oferece recursos de compilação e impressão de gráficos na tela, facilitando assim a visualização dos resultados obtidos, e reprodutibilidade.

e) Algoritmo de otimização

O NSGA-III representa uma ferramenta computacional de elevada sofisticação na otimização multiobjetivo de sistemas energéticos contemporâneos, destacando-se pela capacidade de gerenciar simultaneamente um número expressivo de objetivos conflitantes. Sua arquitetura, fundamentada em mecanismos de preservação da diversidade mediante pontos de referência bem distribuídos no espaço de objetivos,

permite identificar soluções de Pareto ótimas ou próximas da otimalidade, mesmo em cenários com dimensionalidade elevada.

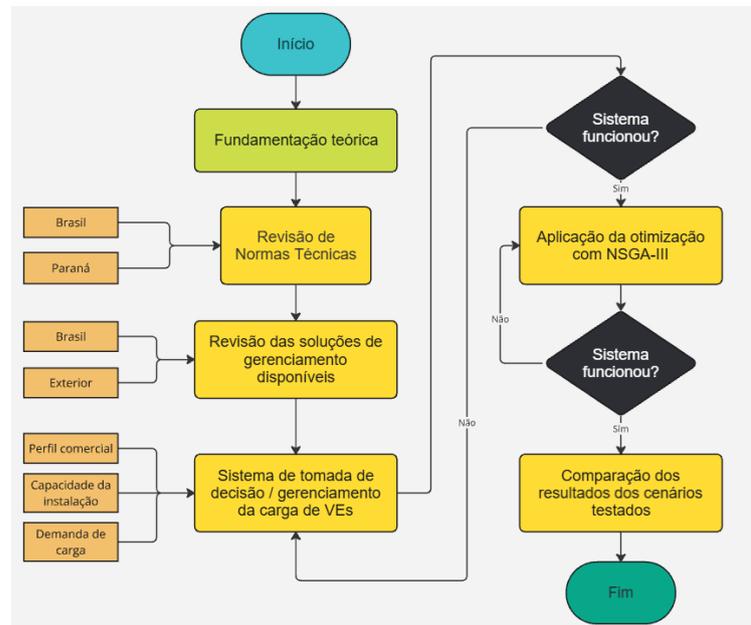
Portanto, este algoritmo entra nesse estudo com o intuito de otimizar a utilização de demanda disponível, especificar quais e quantos carregadores podem ser utilizados no momento, tendo em vista o limite de demanda contratada.

4.3 METODOLOGIA

4.3.1 Desenvolvimento da pesquisa

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizadas as etapas conforme o fluxograma da Figura 11. Primeiramente uma revisão das normas nacionais e internacionais para atendimento a este tipo de demanda e levantamento dos principais obstáculos. Na segunda parte foram avaliados os modelos de gerenciamento de demanda energética para carregadores de VEs em outros trabalhos de pesquisa. Na terceira etapa foi analisada a curva de demanda horária correspondente a um perfil comercial, a fim de se compreender qual o padrão de consumo para este tipo de consumidor. Na quarta etapa foi desenvolvido modelo de otimização do carregamento de VEs para alocação e organização dos carregadores no processo de recarga. Na quinta etapa, foram elaborados cenários para avaliar o comportamento da otimização desenvolvida, comparando com outras soluções através de algoritmo e aplicando a otimização em outras curvas de perfil comercial. Na sexta etapa os resultados foram avaliados e comparados entre si, de acordo com cada cenário estipulado. Na sétima etapa foram listadas as conclusões e as sugestões de continuação para este trabalho.

Figura 11: FLUXOGRAMA PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA



Fonte: o Autor (2025)

4.3.2 Aplicação do NSGA-III na solução

Em um primeiro momento a alocação do carregamento de VEs se deu através de uma lógica onde caso houvesse demanda disponível para comportar o carregador a ser utilizado até completar a carga da bateria do VE conectado, o carregamento iniciaria. Porém, apesar da aplicação lógica no arranjo de alocação do carregamento dos VEs e do uso da demanda no código inicial, devido à complexidade da iteração de diversos objetivos e caminhos possíveis, a utilização de um algoritmo genético para a solução destes problemas se mostrou evidente.

O uso de algoritmos evolutivos, como o NSGA-III, demonstra ser uma abordagem eficaz para resolver problemas complexos de otimização, garantindo um equilíbrio entre eficiência e viabilidade operacional. Quando aplicado a um problema com funções objetivo e funções de restrição, seu funcionamento segue um processo estruturado que combina conceitos de dominância de Pareto, preservação de diversidade e pontos de referência.

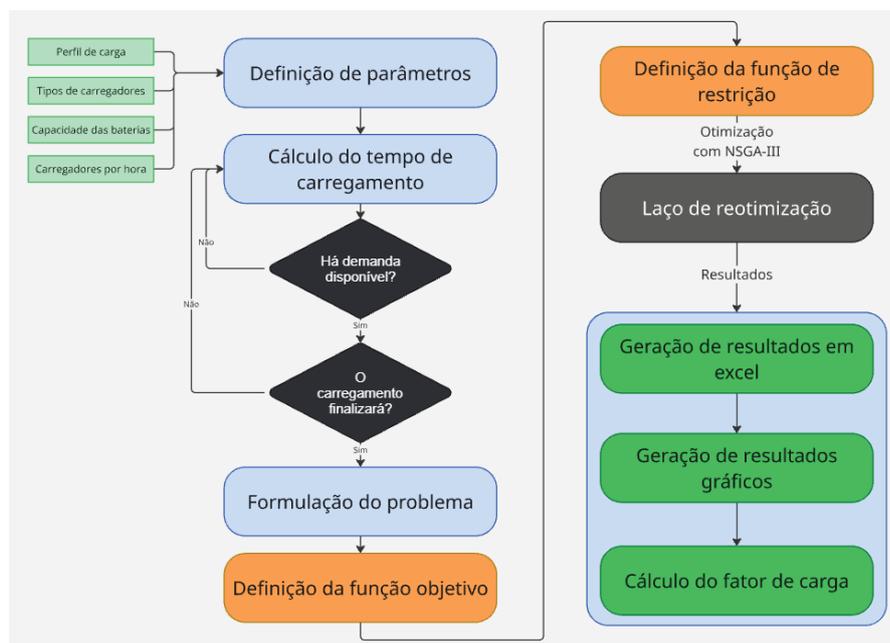
O modelo com otimização utilizando NSGA-III foi aplicado a fim de alocar as cargas dos carregadores de VEs da melhor maneira ao longo de 24 horas, levando-se em

consideração o consumo representado pela curva do perfil comercial e sem ultrapassar o limite da demanda contratada estipulado, otimizando assim o uso da demanda já disponível para a unidade consumidora.

4.3.3 Descrição do fluxo do modelo

Para o modelo desenvolvido foram definidos os parâmetros do sistema, incluindo o perfil de carga comercial utilizado como referência, o qual contém dados da demanda de Dias Úteis (DUs), sábados, domingos e feriados, tipos de carregadores, capacidade das baterias, e limite de carregadores, conforme mostrado na Figura 12. Destaca-se que essa carga comercial representa a demanda base da rede, sobre a qual serão arranjados os carregamentos dos VEs até o limite de demanda de energia contratada.

Figura 12: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DESENVOLVIDO



Fonte: o Autor (2025)

O modelo de solução considera três tipos de carregadores, sendo eles o de 3,6 kW, de 7 kW e 22 kW. Também são especificadas três capacidades de bateria para os respectivos carregadores, sendo elas: a capacidade de carga lenta (10 kWh), semi-rápida (50 kWh) e rápida (50 kWh), conforme citado no item 4.3.2. Para determinar a duração

de cada sessão de carregamento, modelo determina o tempo necessário para que cada VE atinja a carga total com base na potência do carregador escolhido, considerando-se que a potência utilizada para recarga seja a potência nominal do carregador durante todo o tempo. Dessa forma, é possível prever a ocupação dos carregadores ao longo do dia e evitar sobrecargas no sistema.

Seguindo essa lógica, o modelo de otimização gera uma população aleatória de soluções candidatas dentro do espaço de busca definido. Cada solução é representada como um vetor de variáveis de decisão que serão posteriormente avaliadas. Para cada solução candidata, uma função objetivo $f1$ é calculada para determinar seu desempenho, enquanto a função de restrição $g1$ é verificada para garantir a viabilidade da solução, tipicamente, restrições são formuladas de modo que $g1 \leq 0$ indica que a restrição é satisfeita.

Para este trabalho, foi utilizada a função objetivo $f1$ (Equação 1) com o objetivo de maximizar a carga total consumida pelo total de VEs ao longo das 24 horas.

$$\text{Função objetivo} \quad \max_{f_1}(x) = \sum_{t_0=1}^{t=24} \text{carga_ve}(t) \quad (1)$$

Onde:

- $x = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_i]$ representa o número total de veículos otimizados para os três tipos de carregadores;
- $\text{carga_ve}(t)$ é a energia consumida pelo VE na hora t ;

Já a função de restrição garante que a soma da carga comercial e a da carga dos VEs não ultrapasse o limite definido em nenhuma das 24 horas do dia, conforme descrito na Equação 2.

$$\text{Função de restrição} \quad g_t(x) = \text{carga}_{\text{comercial}(t)} + \text{carga}_{\text{vet}(t)} - \text{limite}_{\text{demanda}} \leq 0 \quad (2)$$

para $t = 1, \dots, 24$

Onde:

- $\text{carga}_{\text{comercial}(t)}$ representa a curva do perfil comercial utilizado como referência

- $limite_{demanda}$ é o valor da demanda contratada para o edifício

Com $f1$ e $g1$ definidos, na próxima etapa para a formulação do problema de otimização, uma classe específica define as variáveis de decisão, ou seja, o número de veículos por tipo de carregador em cada hora, buscando maximizar a energia total fornecida aos VEs. A restrição principal garante que a soma da carga utilizada pelo edifício e da carga dos veículos não ultrapasse o limite de demanda contratado, valor especificado anteriormente. Na resolução dessa otimização que é aplicado o algoritmo NSGA-III, que gera diferentes configurações de carregamento e busca a melhor solução ao longo de 500 gerações.

Após a execução inicial da otimização, os resultados são aplicados a um modelo de simulação que distribui os carregamentos ao longo das 24 horas do dia. O algoritmo verifica se a solução encontrada atende às restrições de demanda, caso não atenda, reinicia o processo com variações na população de soluções, mas caso as restrições sejam atendidas o algoritmo reiniciará em busca de um melhor resultado. Esse refinamento continua até que um limite de iterações seja atingido, buscando sempre melhorar a última melhor solução. Para garantir um ajuste fino, uma função simula a alocação horária dos carregamentos e ajusta pequenas variações nos tempos de carregamento para evitar exceder a demanda máxima.

Os resultados da otimização são então armazenados e exportados em um arquivo de saída, permitindo análise posterior e aplicação prática. Além disso, um gráfico é gerado para visualizar a evolução da carga total ao longo do dia, comparando a demanda comercial com a energia fornecida aos VEs. A solução final apresenta uma distribuição otimizada dos carregamentos e um fator de carga, que demonstra numericamente entre 0 e 1, a média de quanto da energia contratada pela concessionária de energia está sendo utilizada, garantindo que o uso da infraestrutura elétrica seja maximizado sem comprometer sua estabilidade.

Por fim, a implementação do modelo permite avaliar estratégias eficientes para a integração de VEs na rede elétrica, contribuindo para um planejamento energético mais sustentável. A metodologia utilizada pode ser aplicada a diferentes cenários, adaptando-se a variações na capacidade da rede e no número de veículos a serem carregados.

5 TESTES E ANÁLISES DE RESULTADOS

Como forma de avaliar o modelo desenvolvido para alocação do carregamento de VEs com restrição de demanda, conforme descrito na subseção 4.3.2, foi considerado como limite de demanda 300kVA.

Assim, para avaliar o modelo primeiramente foram traçados os cenários de teste. Os cenários 1 e 2 foram considerados com limitação de entrada de VEs e alocação do carregamento com restrição de demanda. O cenário 3 foi avaliado sem limitação de entrada de VEs e com restrição de demanda para alocação do carregamento. E os cenários 4, 5 e 6 foram avaliados aplicando-se o modelo de otimização pelo NSGA-III, sem limitação de entrada de VEs e com restrição de demanda para alocação do carregamento.

Destaca-se que, nos cenários 1, 2, 3 e 4 foi considerada uma curva de carga comercial representativa para DUs, o cenário 5 para uma curva de carga comercial típica aos sábados e o cenário 6 uma curva de carga comercial característica de domingos e feriados.

Adicionalmente, para comparar os cenários, utilizou-se o fator de carga, onde calcula-se a média da utilização da demanda total instalada, sendo 1 o cenário em que se utilizou a demanda total durante as 24 horas do dia e 0 onde não se utilizou nada da demanda nesse período.

5.1 ADIÇÃO DE UM VE DE CADA TIPO POR HORA

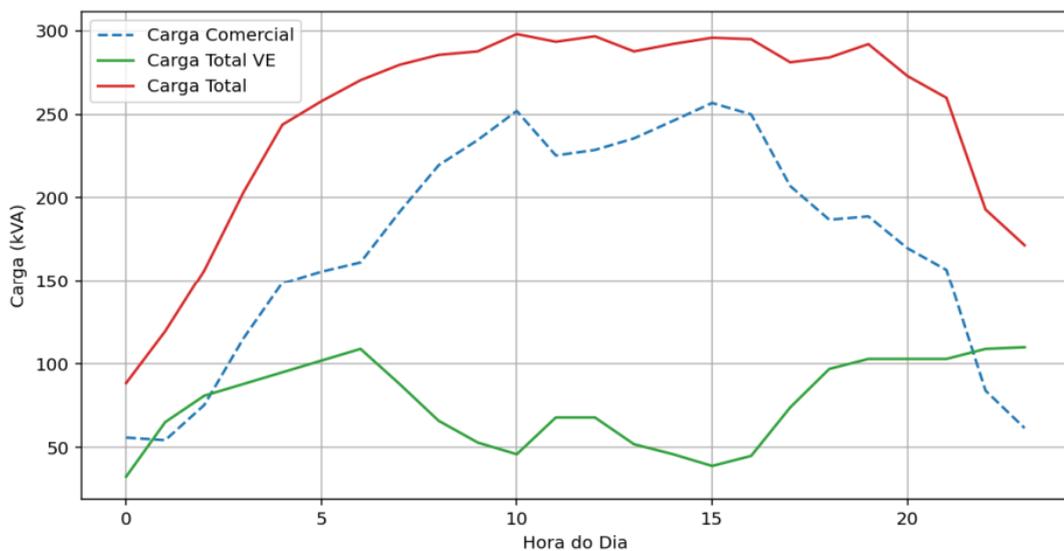
Para o primeiro cenário foi considerada a curva de carga comercial para DUs e implementada uma lógica simples, a qual verificava apenas se era possível iniciar o carregamento de um dos carregadores sem extrapolar a potência instalada de 300kW, mas também aplicava a condição de que este carregamento deveria ser concluído respeitando a mesma limitação.

Sendo assim, nas primeiras horas do dia, onde a curva de carga apresenta menor consumo, a cada hora iniciou-se o carregamento com um carregador de 3,6 kW, um carregador de 7 kW e um carregador de 22 kW. Porém, para respeitar a condição de ser

possível finalizar o carregamento iniciado e com o consumo aumentando, a partir da hora 3 apenas carregadores de 7 kW iniciaram, e a partir da hora 7 os carregadores de 22 kW, que demandam mais potência, já não conseguiam iniciar o carregamento.

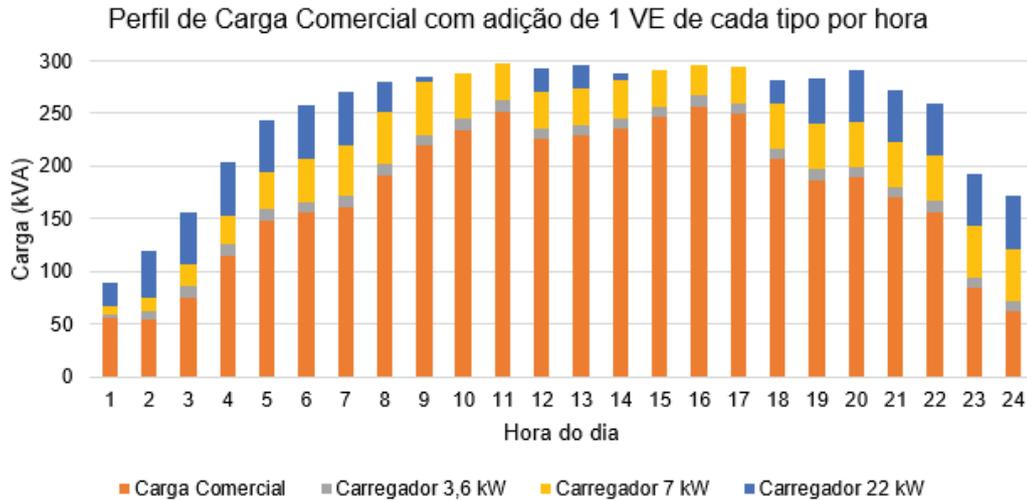
Entre 8 e 17h, horário comercial, houve predominância de carregadores de 7 kW e constância de carregadores de 3,6 kW, com alguns carregadores rápidos pontuais. Já após as 18h, com a diminuição do consumo da curva de carga comercial, os carregadores rápidos voltam a ser acionados. Com esse cenário, calculando-se o fator de carga chegou-se ao valor de 0,8340. As Figuras 13 e 14 apresentam o perfil de carga resultante da carga acumulada comercial e da alocação do carregamento de VEs para o cenário 1.

Figura 13: PERFIL DE CARGA COMERCIAL E ADIÇÃO DE UM VE DE CADA TIPO POR HORA



Fonte: o Autor (2025)

Figura 14: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 1



Fonte: o Autor (2025)

5.2 ADIÇÃO DE DOIS VES DE CADA TIPO POR HORA

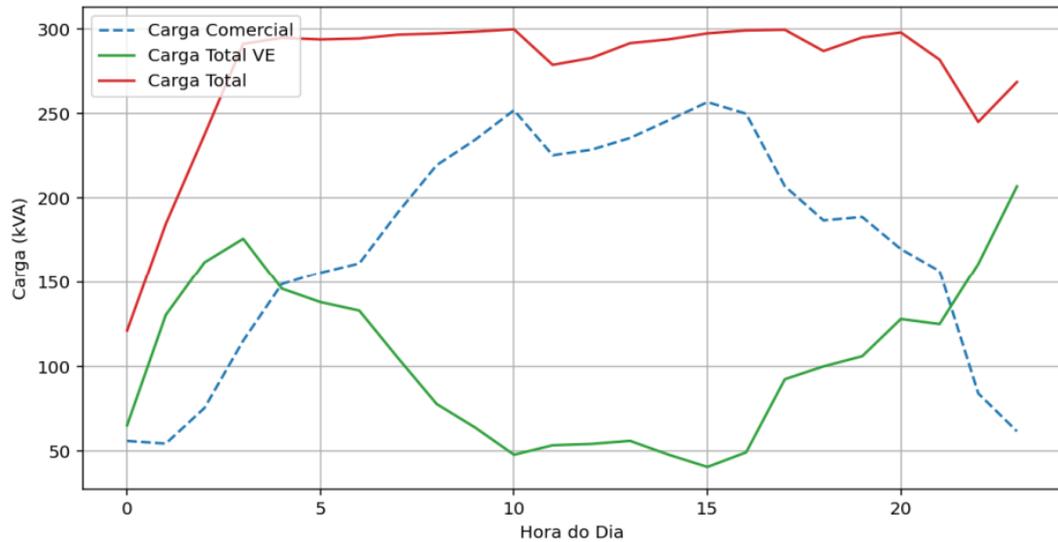
Análogo ao cenário anterior, este cenário considera a mesma curva de carga comercial típica para DUs, mas agora o algoritmo tenta incluir mais dois carregadores por tipo por hora, respeitando os mesmos 300 kVA de demanda contratada como restrição e sem otimização da alocação da carga.

Visto que os cenários são parecidos, o comportamento foi de certa forma semelhante, diferindo um pouco na maior utilização da demanda disponível na instalação, também tendo picos antes e depois do horário comercial e um vale durante esse período.

Contudo a utilização de carregadores rápidos agora se concentrou no início e no final do dia, com uma distribuição quase constante de carregadores lentos e semi-rápidos durante o dia todo.

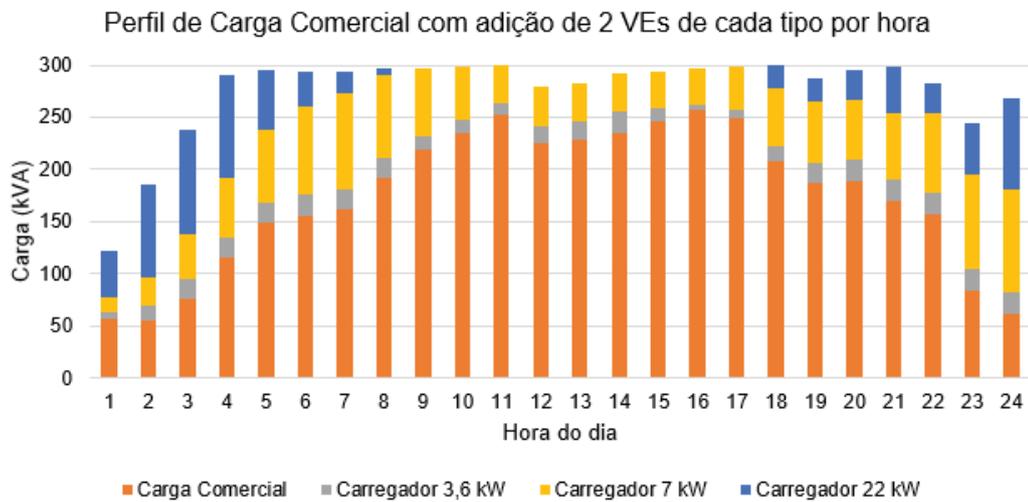
Como resultado, neste cenário obteve-se um fator de carga de 0,9205, resultante da maior alocação do carregamento de VEs nas primeiras horas do dia, e nos horários após o horário comercial (a partir das 18h). As Figuras 15 e 16 apresentam os perfis de carga resultantes desta análise.

Figura 15: PERFIL DE CARGA COMERCIAL COM ADIÇÃO DE 2 VES DE CADA TIPO POR HORA



Fonte: o Autor (2025)

Figura 16: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 2



Fonte: o Autor (2025)

5.3 ALOCAÇÃO SIMPLES DE VES DENTRO DO LIMITE DE DEMANDA

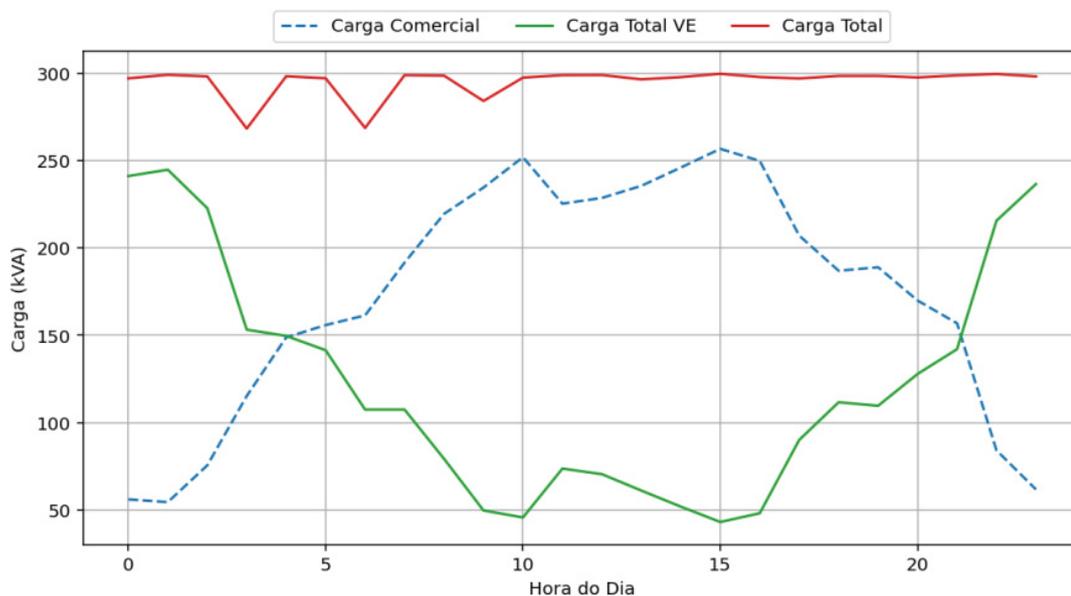
Neste cenário foi considerada a alocação simples do máximo de carregadores de cada tipo por hora, sem limitação de entrada de VEs e com restrição de demanda para alocação do carregamento.

Neste caso, a distribuição de cada tipo de carregador já se torna um pouco diferente dos cenários anteriores, visto que nas primeiras e últimas horas do dia o requisito de máximo número de carregadores faz o algoritmo optar por muitos carregadores lentos, adicionando carregadores rápidos e semi-rápidos em quantidades menores entre as 4 e as 22h, enquanto mantém alguns poucos carregadores lentos neste período.

Assim temos uma diferença considerável na decisão tomada, mas também no número total de carregadores alocados durante um dia útil.

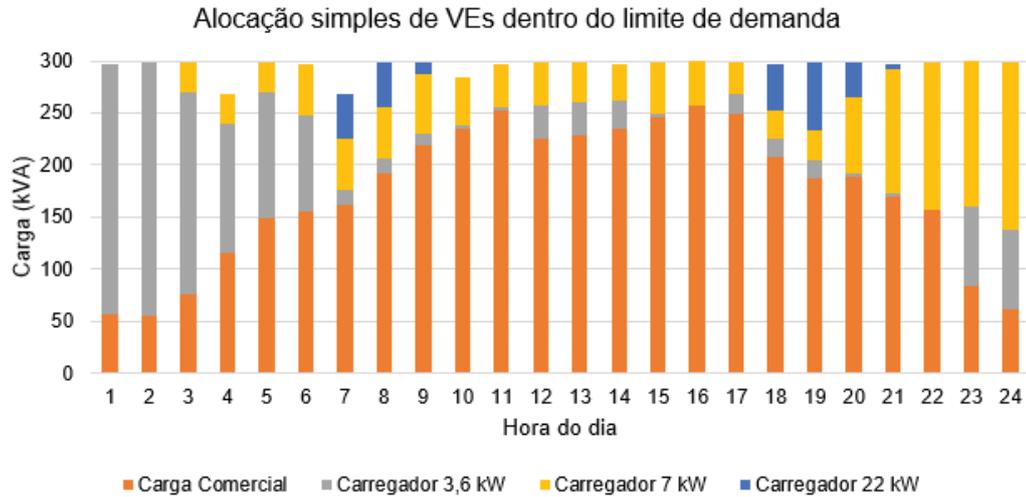
Com essa melhoria o algoritmo entregou um fator de carga mais próximo do cenário ideal, atingindo 0,9841, podendo ser observado nas Figuras 17 e 18 o maior preenchimento da curva de carga acumulada em relação ao limite de demanda de 300 kVA em quase todas as horas do dia.

Figura 17: PERFIL DE CARGA COMERCIAL COM ADIÇÃO DO MÁXIMO POSSÍVEL DE VES POR HORA



Fonte: o Autor (2025)

Figura 18: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 3



Fonte: o Autor (2025)

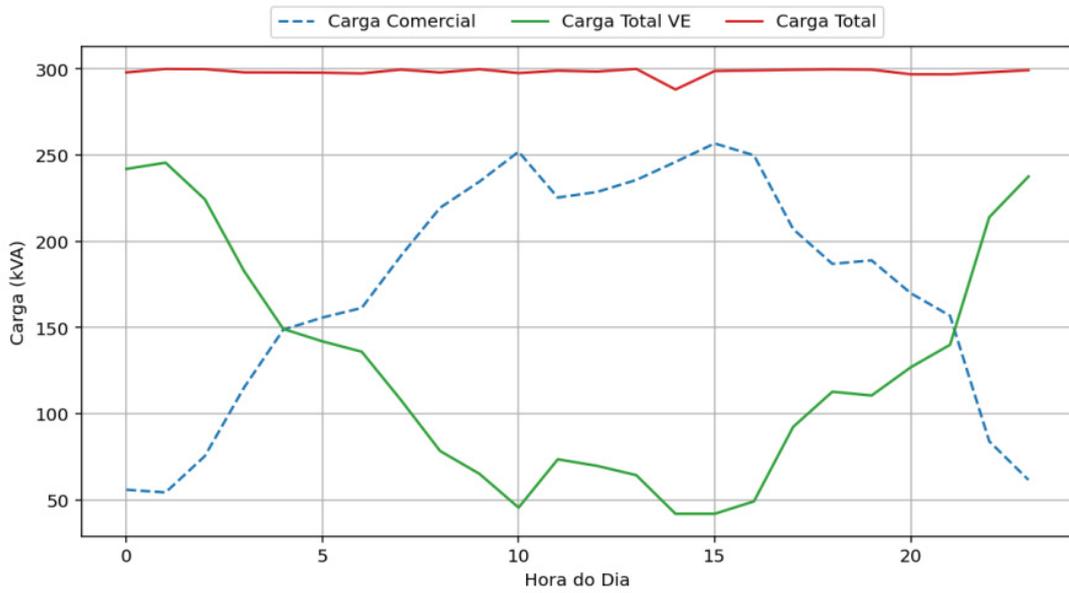
5.4 CURVA DE CARGA COMERCIAL TÍPICA DE DIAS ÚTEIS E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III

Utilizando a mesma curva comercial para DUs, este é o primeiro cenário em que foi implementada a otimização através do NSGA-III, a qual contempla a inclusão da maior quantidade possível de carregadores respeitando a função de restrição especificada no item 4.4.3.

Assim, o algoritmo opta por um número alto de carregadores rápidos nas primeiras duas horas do dia, um número expressivo de carregadores do tipo lento entre 2 e 6h da manhã, em seguida mantém um número constante de carregadores semi-rápidos com alguns horários pontuais com mais carregadores lentos. Em complemento se observa que após as 19h o número de carregadores semi-rápidos começa a subir juntamente com a inclusão de alguns carregadores rápidos.

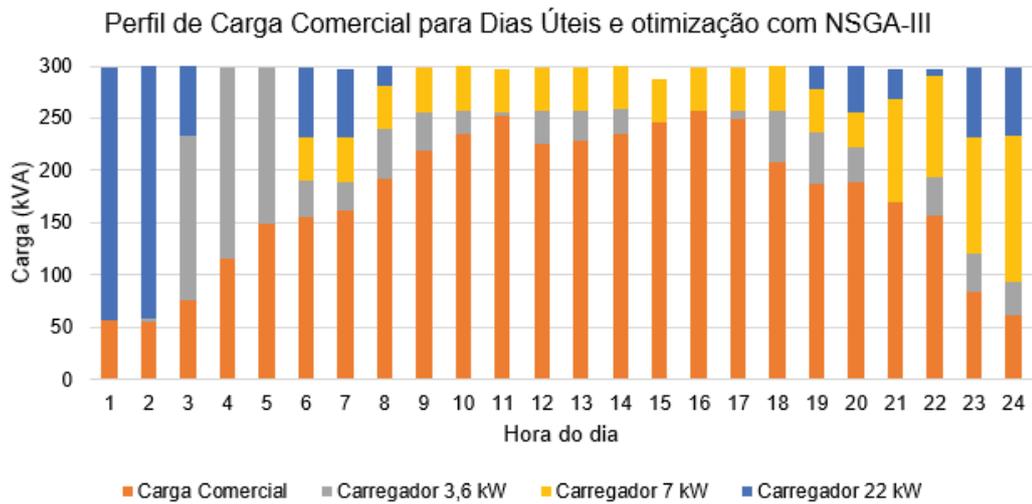
Com a otimização proporcionada pelo NSGA-III o resultado se mostrou ainda mais próximo do valor ideal, atingindo um fator de carga de 0,9940, conforme se observa nas Figuras 19 e 20 com a curva de carga acumulada próxima ao limiar da demanda de carga máxima.

Figura 19: PERFIL DE CARGA COMERCIAL COM ADIÇÃO DO MÁXIMO DE VES POR HORA E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III



Fonte: o Autor (2025)

Figura 20: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 4



Fonte: o Autor (2025)

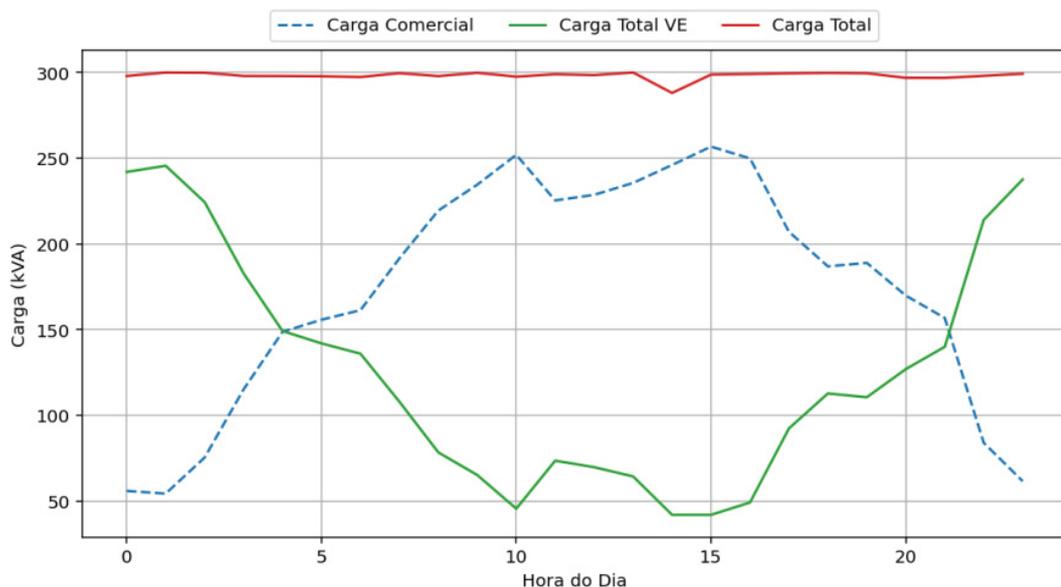
5.5 CURVA DE CARGA COMERCIAL TÍPICA DE SÁBADOS E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III

Utilizando-se da aplicação do modelo de otimização NSGA-III do cenário anterior, o algoritmo foi executado para a curva de carga comercial típica para os sábados, ou seja, com a alteração no perfil de consumo, trazendo variabilidade na alocação de carregadores.

Semelhante ao perfil de carga para DUs, há um pico de carregadores do tipo lento entre 2 e 6h da manhã, uma constância de carregadores lentos e semi-rápidos até as 18h e um aumento dos carregadores semi-rápidos e rápidos após as 18h.

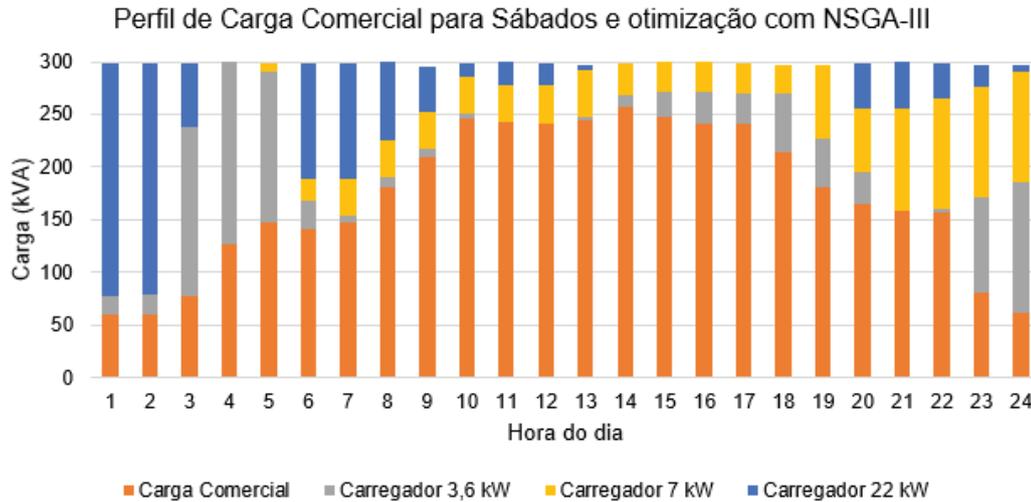
O resultado da aplicação do modelo de otimização apresenta desempenho equivalente ao cenário 4, alcançando um fator de carga de 0,9950. Esse resultado evidencia o elevado desempenho do modelo NSGA-III na otimização da alocação do carregamento de VEs, mantendo o perfil de carga acumulado muito próximo do limite máximo permitido, como pode ser observado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21: APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO NO PERFIL DE CARGA COMERCIAL PARA SÁBADOS



Fonte: o Autor (2025)

Figura 22: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 4: VARIAÇÃO SÁBADOS



Fonte: o Autor (2025)

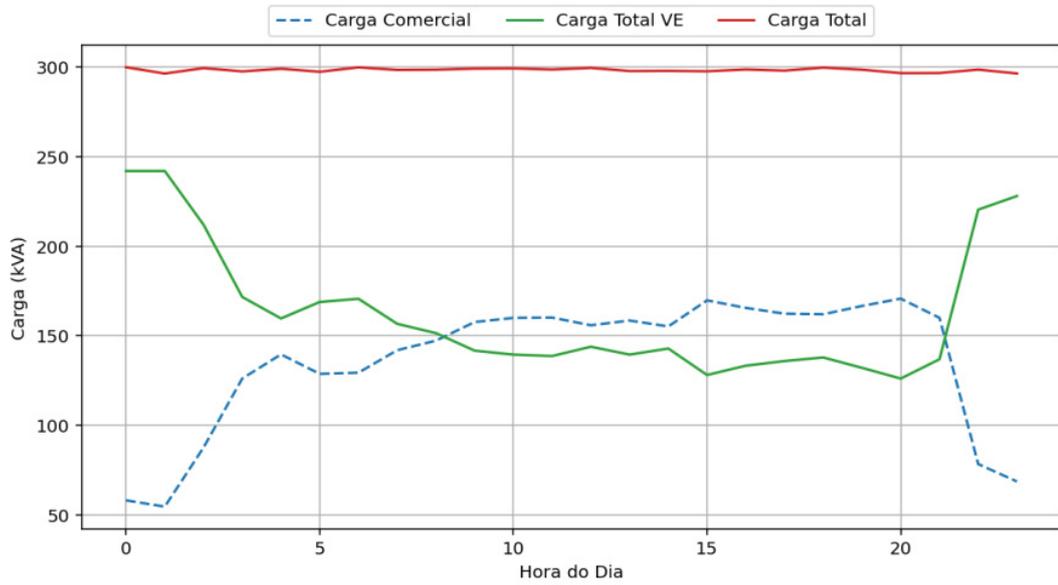
5.6 CURVA DE CARGA COMERCIAL TÍPICA DE DOMINGOS E FERIADOS E OTIMIZAÇÃO COM NSGA-III

A curva de carga comercial característica para domingos e feriados apresenta uma variação considerável em seu perfil, visto que há uma alteração nas atividades nesses dias. Assim, houve uma alteração na distribuição de carregadores durante o dia.

Como observado nos resultados, até as 4h há uma presença considerável de carregadores do tipo rápido, no entanto, entre 4 e 12h identifica-se uma predominância de carregadores do tipo semi-rápidos. Também foi identificado um pico de carregadores lentos entre 13 e 17h seguido de uma predominância de carregadores semi-rápidos entre 19 e 24h.

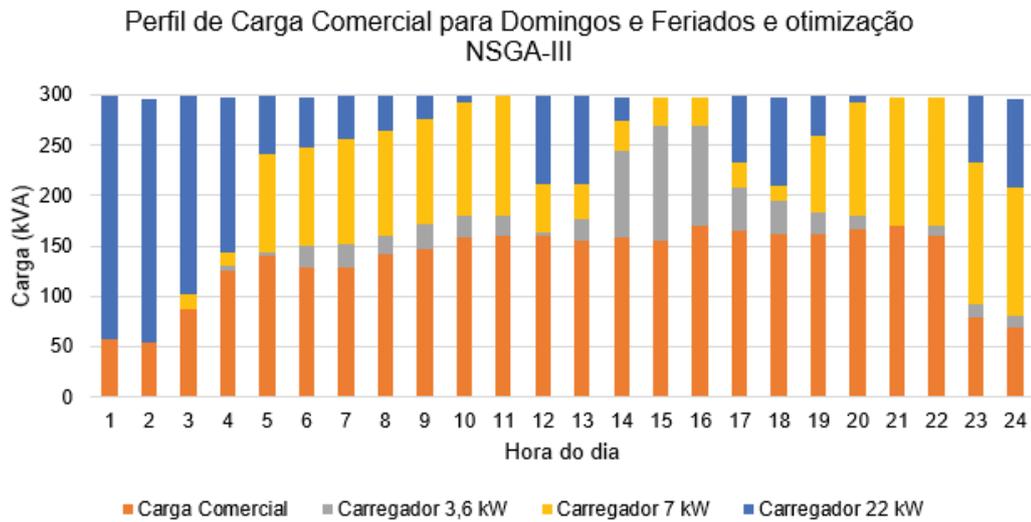
Esse resultado de alocação de carregadores se difere bastante dos dois anteriores. Isso se deve ao fato do perfil de carga comercial, visto que a lógica de otimização aplicada foi a mesma. Assim a aplicação do modelo de otimização NSGA-III novamente apresentou um resultado expressivo, atingindo um fator de carga de 0.9945, conforme indicado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23: APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO NO PERFIL DE CARGA COMERCIAL PARA DOMINGOS E FERIADOS



Fonte: o Autor (2025)

Figura 24: DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA CENÁRIO 4: VARIAÇÃO DOMINGOS E FERIADOS



Fonte: o Autor (2025)

5.7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.7.1 Análise da aplicação do NSGA-III

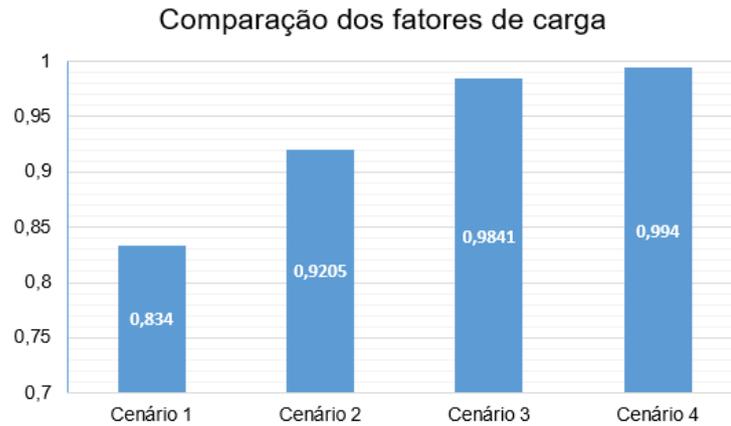
Para uma avaliação de resultados mais realista, optou-se por fazer a comparação do perfil de carga de DUs, colocando os quatro cenários iniciais (cenários 1, 2, 3 e 4) lado a lado. No cenário 1 observou-se uma distribuição quase que uniforme da carga de carregadores durante as primeiras oito horas do dia, conforme observado na Figura 14, esbarrando no limite de demanda entre as nove e as dezessete horas, retornando com a distribuição quase uniforme de carregadores até o fim do dia.

Já no cenário 2 o modelo esbarra na limitação de demanda na hora seis, a partir disso os carregadores rápidos já não são ligados, retornando apenas após as dezoito horas indo até o fim do dia, conforme observado na Figura 16.

Pode-se observar que já na primeira melhoria no modelo, aplicada no cenário 3 e representado na Figura 18, onde para a alocação de carregadores apenas era levado em consideração se era possível ou não adicionar carregadores sem extrapolar a demanda instalada, ocorreu um ganho significativo no fator de carga, com maior aproveitamento da demanda de energia limite em comparação ao cenário dois. Esse avanço se deve, principalmente, à maior ocupação da demanda disponível nos períodos de menor consumo do perfil comercial.

Por fim, no cenário 4, no qual foi empregado o modelo de otimização com NSGA-III, o algoritmo conseguiu alocar melhor os carregadores nas primeiras e últimas horas do dia, que são períodos com menor utilização da demanda, otimizando a utilização de cada tipo de carregador, como denotado na Figura 20. Assim este cenário atingiu o seu melhor índice em comparação aos cenários de teste, com expressivo valor de fator de carga de 99.4%, muito próximo do fator de carga ideal, conforme indicado na Figura 25.

Figura 25: COMPARAÇÃO DE FATORES DE CARGA PARA CADA CENÁRIO

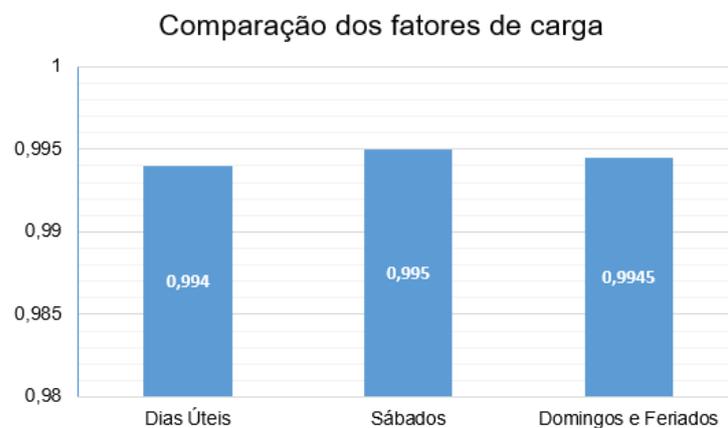


Fonte: o Autor (2025)

5.7.2 Avaliação da otimização com outras curvas de carga comerciais

Após comparar os dados entre os cenários aplicando a curva de carga comercial para DUs, pode-se avaliar também o comportamento da otimização para outros dois diferentes perfis de carga, representados pelas curvas típicas de sábados e de domingos e feriados, respectivamente os cenários 5 e 6. Os resultados obtidos pela aplicação do modelo NSGA-III para a alocação do carregamento de VEs para as diferentes curvas de carga comerciais são apresentados na Figura 26.

Figura 26: COMPARAÇÃO DE FATORES DE CARGA ENTRE OS PERFIS UTILIZADOS



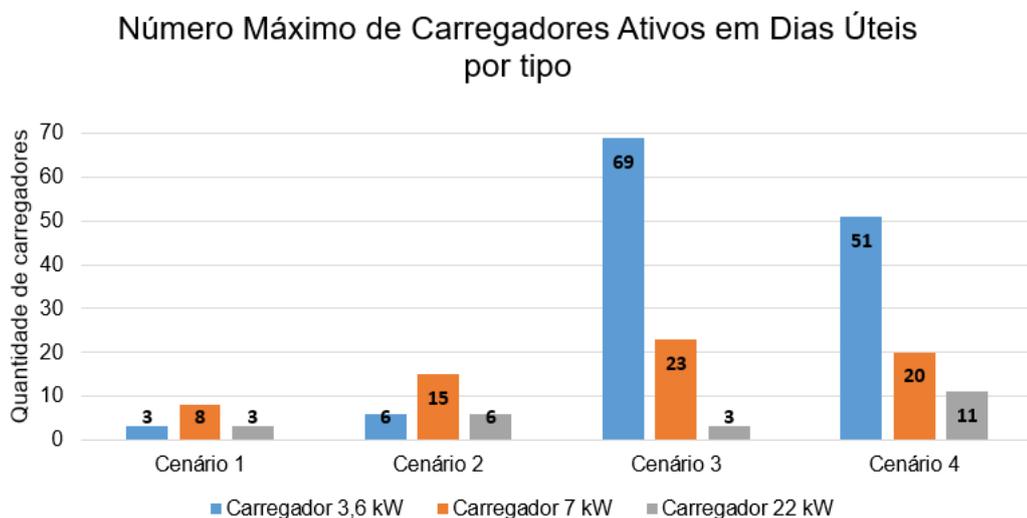
Fonte: o Autor (2025)

Consegue-se observar que apesar das diferenças de distribuição de carga dos três perfis de carga, a otimização conseguiu apresentar resultados muito semelhantes no quesito fator de carga. Mesmo que a alocação de cada tipo de carregador tenha sido priorizada de maneiras diferentes, como observado nas Figuras 20, 22 e 24, o modelo desenvolvido conseguiu se provar eficaz e generalista para otimizações diversas neste contexto.

5.7.3 Quantidade de carregadores ativos

Outro dado relevante que pode ser avaliado pela aplicação da metodologia desenvolvida foi a quantidade de carregadores ativos ao longo do período de análise. Para cada cenário foi registrado o número mais alto de cada tipo de carregador durante o dia, sendo estes picos não simultâneos entre os tipos de carregador. Com isso, obteve-se o gráfico ilustrado na Figura 27.

Figura 27: NÚMERO MÁXIMO DE CARREGAMENTOS ATIVOS EM DUS POR TIPO DE CARREGADOR



Fonte: o Autor (2025)

Com esses valores podemos comparar a quantidade de carregadores que cada cenário utilizou para cada tipo de carregador. Nos cenários 1 e 2 houve uma baixa quantidade de carregadores utilizada, dada a limitação de carregadores adicionados por

hora. Já no cenário 3 observa-se que, tendo como base apenas a limitação de demanda, houve um aumento significativo do número de carregadores de cada tipo considerados pelo modelo. Por fim, o cenário 4, representado pelo cenário onde foi aplicado o modelo de otimização NSGA-III, teve como resultado uma quantidade de carregadores de cada tipo menos elástica que no cenário 3. Porém este cenário também apresentou a presença majoritária de carregadores do tipo lento, seguida pelos carregadores do tipo semi-rápido e rápido.

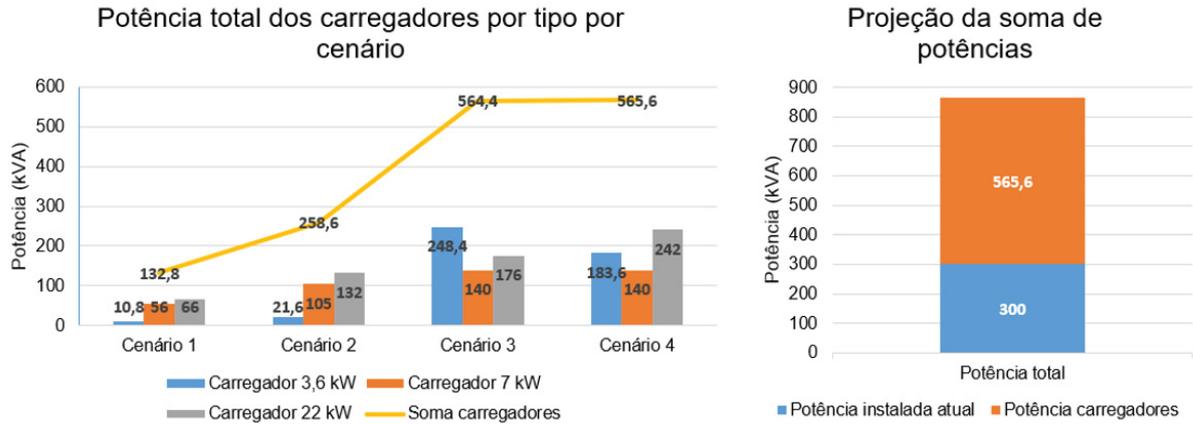
Estes valores obtidos no cenário 4 podem ser utilizados como base para dimensionar um parque de carregadores, utilizando-se de uma curva de carga que caracterize a região de aplicação do projeto, estas seriam as quantidades de carregadores utilizadas com a melhor alocação de demanda.

5.7.4 Avaliação de impactos financeiros na infraestrutura considerada

Sendo um dos objetivos principais deste estudo, não podemos deixar de avaliar qual seria a potência necessária para utilizar todos os carregadores calculados no item anterior. Partindo do número máximo de cada tipo de carregador para o cenário 4 conforme demonstrado na Figura 27, deve-se considerar 51 carregadores tipo lento, 20 carregadores tipo semi-rápidos e 11 carregadores tipo rápidos. Calculando-se a potência para cada carregador, conforme citado no item 4.3.2.b, teríamos respectivamente 183,6 kVA, 140 kVA e 242 kVA, respectivamente para os carregadores do tipo lento, semi-rápido e rápido, conforme indicado na Figura 28.

Portanto, considerando-se um fator de utilização igual a 100%, que seria o pior cenário, ou seja, com todos os 82 carregadores ligados ao mesmo tempo, deve-se adicionar 565,6 kVA à demanda contratada. Considerando os 300 kVA já existentes, a demanda total necessária passaria a ser de 865,6 kVA.

Figura 28: POTÊNCIA TOTAL DOS CARREGADORES POR TIPO E POR CENÁRIO



Fonte: o Autor (2025)

Esse valor total representa cerca de 288% da potência instalada original da infraestrutura considerada no item 4.3.2.a. Para atingir essa demanda, seriam necessários investimentos significativos em infraestrutura, incluindo adequações na entrada de energia ou até a contratação de uma entrada exclusiva para os carregadores, além da necessidade de revisão do contrato de fornecimento junto à concessionária local, a possibilidade de no momento não haver suporte por parte da concessionária para tal ampliação.

5.7.5 Análise comparativa com a revisão de literatura

Baseando-se na literatura citada neste trabalho, pode-se relacionar este trabalho com os estudos de Andrenacci et al., (2023) e Cui et al. (2023), que propuseram soluções para contornar o pico de utilização da rede, onde ambos os trabalhos utilizaram energia fotovoltaica para suprir a demanda em horários de pico, mesmo que utilizando métodos diferentes entre si. Porém, se aplicado um sistema semelhante ao algoritmo desenvolvido neste trabalho poderia haver um controle da demanda disponível para recarga, aproveitando tanto a demanda local como a disponibilizada pelo sistema de energia solar.

Já os trabalhos de Li et al. (2022), Hua et al. (2024) e Zhao et al. (2024) podem ser relacionados no princípio da otimização utilizada, visto que os três trabalhos mostram

aplicações do NSGA-III para cenários multiobjetivo relacionados a carregamento de VEs, assim como realimentações buscando o melhor resultado para cada estudo.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A análise comparativa dos seis cenários testados mostrou que o algoritmo genético NSGA-III foi a melhor solução para maximizar o uso das instalações existentes, se mostrando eficiente e versátil, também mostrando a capacidade real de alocação de carregadores em uma infraestrutura existente, antes que seja considerada a ampliação da demanda contratada e a infraestrutura necessária para isso. Assim, podemos concluir que algoritmo demonstrou capacidade superior para equilibrar múltiplos objetivos e gerar soluções robustas, confirmando a hipótese principal da pesquisa.

O sistema otimizado apresentou comportamento inteligente e adaptativo conforme a demanda elétrica. Em períodos de baixa demanda comercial, como horários noturnos, o algoritmo priorizou carregadores de alta potência, aproveitando a capacidade ociosa da rede. Durante os picos de demanda, o sistema favoreceu carregadores de baixa potência, evitando sobrecargas na infraestrutura. Também é importante destacar que na comparação dos cenários 4, 5 e 6, onde a curva de carga foi variada, o resultado variou muito pouco, mantendo-se muito próximo do fator de carga unitário. Essa adaptação demonstra eficiência na gestão dos recursos energéticos disponíveis.

Embora represente uma etapa inicial da pesquisa, os resultados obtidos são promissores e demonstram potencial para aplicações práticas relevantes. A solução desenvolvida pode ser aplicada não apenas ao carregamento de veículos elétricos, mas também a outros sistemas de gerenciamento de cargas com características similares, ampliando significativamente seu impacto potencial.

Os objetivos estabelecidos foram plenamente alcançados, com resultados que excedem as expectativas iniciais em termos de eficácia técnica e aplicabilidade prática. Esta pesquisa contribui cientificamente tanto pela validação da metodologia de otimização quanto pela demonstração de sua viabilidade em aplicações reais. Os resultados estabelecem uma base sólida para futuras investigações que poderão expandir e aprimorar a abordagem proposta.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um leque de opções para futuras pesquisas, desde melhorias no próprio algoritmo, como por exemplo na aplicação de curvas de carga reais, como também na estrutura geral da solução, implementando automação para chaveamento de relês para acionar os carregadores, controle de potência para manter o carregamento mesmo que leve mais tempo, entre outros.

Ainda dentro do algoritmo, pode-se aplicar sistemas de preferências para recargas, limites de carregadores ativos por tipo, como limitar a quantidade de carregadores rápidos ativos, por exemplo, ou ainda incluir uma lógica de tomada de decisão para carregar apenas em tarifas horárias de valor mais baixo.

Outra possibilidade seria estudar a aplicação real de um algoritmo embarcado em hardware com a otimização desenvolvida em um sistema com tomada de decisão real, chaveando o acionamento dos carregadores de maneira a controlar a demanda baseando-se em leituras de consumo em tempo real.

Também há espaço para aplicação de energias renováveis, como a energia fotovoltaica, e também o armazenamento temporário de energia através de banco de baterias ou até mesmo banco de capacitores, afim de estudar contensão de surtos pontuais de tensão na rede local.

Deve-se citar também que durante o período de desenvolvimento deste trabalho, sob a orientação do professor Alexandre Aoki e seus colegas, também foram desenvolvidos trabalhos de conclusão de curso e mestrado em temas relacionados, como estudo de infraestrutura elétrica para carregamento de VEs, estudo de viabilidade de carregamento de ônibus elétricos, entre outros.

Ainda há muitos aspectos relacionados à otimização de carregamento que podem ser explorados, a fim de cada vez mais viabilizar e ampliar o acesso à essa tecnologia para a população que, hoje, ainda apresenta diversos preconceitos e receios relacionados à veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

ANDRENACCI, N.; CAPUTO, G.; BALOG, I. Comparing Charging Management Strategies for a Charging Station in a Parking Area in North Italy. **Future Transportation**, v. 3, n. 2, p. 684–707, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão**. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17019:2022 Instalações elétricas de baixa tensão - Requisitos para instalações em locais especiais - Alimentação de veículos elétricos. , 2022. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Acesso em: 7/12/2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Veículos plug-in atingem 70% dos eletrificados em abril e batem novo recorde. Disponível em: <<https://abve.org.br/em-agosto-veiculos-plug-in-completam-um-ano-na-lideranca-dos-eletrificados/>>. Acesso em: 21/9/2024a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Mercado de veículos elétricos plug-in cresce 200% nos últimos 12 meses. .

BSA ELECTRONICS. NEMA PLUG AND OUTLET CHART. Disponível em: <<https://www.bsaelectronics.com/pages/nema-plug-and-outlet-chart>>. Acesso em: 13/6/2024.

CAR AND DRIVER. Tested: Best EV Chargers for 2024. Disponível em: <<https://www.caranddriver.com/shopping-advice/a39917614/best-home-ev-chargers-tested/>>. Acesso em: 4/6/2024a.

CAR AND DRIVER. Tested: Best EV Chargers for 2024. Disponível em: <<https://www.caranddriver.com/shopping-advice/a39917614/best-home-ev-chargers-tested/>>. Acesso em: 5/6/2024b.

COPEL. NTC 902210 ESTAÇÕES DE RECARGA DE VEÍCULO ELÉTRICO. , 2022a.

COPEL. NTC 902210 ESTAÇÕES DE RECARGA DE VEÍCULO ELÉTRICO. , 2022b.

CUI, D.; WANG, Z.; LIU, P.; et al. Coordinated Charging Scheme for Electric Vehicle Fast-Charging Station with Demand-based Priority. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

ENEL. **Especificação Técnica no. 126 - Fornecimento de Energia Elétrica a Prédios de Múltiplas Unidades Consumidoras**. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. 2050 long-term strategy. Disponível em: <https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en>. .

HE, Y.; VENKATESH, B.; GUAN, L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1095–1105, 2012. IEEE.

HUA, H.; SHI, J.; CHEN, X.; et al. Carbon Emission Flow Based Energy Routing Strategy in Energy Internet. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 20, n. 3, p. 3974–3985, 2024. IEEE Computer Society.

INGRID DANTAS, N. E. A Gestão da Demanda de Energia: Estratégias para Reduzir Custos. .

INTELLIGENCE, M. Smart Power Meter Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029). Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-electricity-meter-market>>. .

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60364-7-722:2018 Low-voltage electrical installations-Part 7-722: Requirements for special installations or locations-Supplies for electric vehicles**. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook: factsheet. , 2024a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for electric mobility. .

JARUWATANACHAI, P.; SUKAMONGKOL, Y.; SAMANCHUEN, T. Predicting and Managing EV Charging Demand on Electrical Grids: A Simulation-Based Approach. **Energies**, v. 16, n. 8, p. 1–22, 2023.

KARMAKER, A. K.; HOSSAIN, M. A.; POTA, H. R.; ONEN, A.; JUNG, J. Energy Management System for Hybrid Renewable Energy-Based Electric Vehicle Charging Station. **IEEE Access**, v. 11, n. February, p. 27793–27805, 2023. IEEE.

LI, Y.; CAI, Y.; ZHAO, T.; et al. Multi-objective Optimal Operation of Centralized Battery Swap Charging System with Photovoltaic. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 10, n. 1, p. 149–162, 2022. State Grid Electric Power Research Institute Nanjing Branch.

MAHMUD, K.; HOSSAIN, M. J.; RAVISHANKAR, J. Peak-Load Management in Commercial Systems with Electric Vehicles. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 2, p. 1872–1882, 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

MASTOI, M. S.; ZHUANG, S.; MUNIR, H. M.; et al. An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. **Energy Reports**, 1. nov. 2022. Elsevier Ltd.

MERCADO LIVRE DE ENERGIA ELÉTRICA. Mercado Livre de Energia. .

PWC. The US electric vehicle charging market could grow nearly tenfold by 2030: How will we get there? Disponível em: <<https://www.pwc.com/us/en/industries/industrial-products/library/electric-vehicle-charging-market-growth.html>>. Acesso em: 5/6/2024.

SARASWATHI, V. N.; RAMACHANDRAN, V. P. A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles. **Heliyon**, 30. out. 2024. Elsevier Ltd.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Alternative Fuels Data Center. .

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Charger Types and Speeds. Disponível em: <<https://www.transportation.gov/rural/ev/toolkit/ev-basics/charging-speeds>>. Acesso em: 3/6/2024.

WANG, Y.; THOMPSON, J. S. Two-stage admission and scheduling mechanism for electric vehicle charging. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 3, p. 2650–2660, 2019.

ZEEDA ENERGY. **Carregador Zhida Manual do Usuário**. 2022.

ZHAO, A. P.; LI, S.; LI, Z.; et al. Electric Vehicle Charging Planning: A Complex Systems Perspective. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.