



ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE ESTAÇÕES DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM DIVERSIDADE DE CONECTORES

DANIEL ARAUJO VITÓRIA – danielaraujovitoria1@gmail.com
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - IFES

LUIZ VIRGILIO BOZZI ARANDA – luizvirgilio465@gmail.com
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - IFES

MÁRIO MESTRIA – mmestria@uol.com.br
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - IFES

ÁREA: 3. - PESQUISA OPERACIONAL

SUBÁREA: 3.1 – MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

RESUMO: A CRESCENTE ADOÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS (VES) TEM IMPULSIONADO A DEMANDA POR INFRAESTRUTURA DE RECARGA EFICIENTE, DIVERSIFICADA E ESTRATEGICAMENTE DISTRIBUÍDA. ESTE TRABALHO PROPÕE UM MODELO DE ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE UNIDADES DE RECARGA ELÉTRICA QUE CONSIDERA A DIVERSIDADE DE CONECTORES E CONFIGURAÇÕES DE CARGA (CORRENTE ALTERNADA E CONTÍNUA), ATENDENDO TANTO A VEÍCULOS COM CARREGADORES INTEGRADOS QUANTO EXTERNOS. A ABORDAGEM VISA REDUZIR O CUSTO TOTAL DE INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO, AO MESMO TEMPO EM QUE ASSEGURA A COMPATIBILIDADE TÉCNICA ENTRE VEÍCULOS E ESTAÇÕES. O MODELO FOI IMPLEMENTADO POR MEIO DE UM ALGORITMO HEURÍSTICO EM PYTHON, CONSIDERANDO CRITÉRIOS COMO LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA, CAPACIDADE DE POTÊNCIA E NÚMERO MÁXIMO DE PORTAS POR ESTAÇÃO. OS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS FORAM REALIZADOS COM DADOS SINTÉTICOS E REAIS, SIMULANDO DIFERENTES CENÁRIOS DE PENETRAÇÃO DE VES EM REGIÕES URBANAS. OS RESULTADOS DEMONSTRAM QUE A PROPOSTA É EFICAZ NA ALOCAÇÃO COMPLETA DOS VEÍCULOS, COM ESCALABILIDADE E BAIXO TEMPO COMPUTACIONAL, CONTRIBUINDO PARA O PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DA INFRAESTRUTURA DE MOBILIDADE ELÉTRICA.

PALAVRAS-CHAVES: VEÍCULOS ELÉTRICOS, CONFIGURAÇÕES DE CARGAS, CARREGADOR INTEGRADO E EXTERNO, CONECTORES DE CARGA PARA VEÍCULO ELÉTRICO, UNIDADE DE RECARGA ELÉTRICA, SUSTENTABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas, a poluição atmosférica e a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias de transporte mais limpas e eficientes. Nesse contexto, os Veículos Elétricos (VEs) têm se destacado como uma alternativa promissora, oferecendo vantagens como emissões zero de gases poluentes, maior eficiência energética, menor necessidade de manutenção e maior confiabilidade operacional (LACHVAJDEROVÁ; KÁDÁROVÁ, 2021). Segundo Acharige *et al.* (2023), a eletrificação da frota veicular é vista como uma estratégia essencial para mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade urbana.

Entretanto, a expansão do uso de veículos elétricos depende diretamente da disponibilidade e eficiência da infraestrutura de recarga. A escassez e a má distribuição das estações públicas de carregamento ainda são apontadas como barreiras significativas à adoção em larga escala dos VEs, gerando o fenômeno conhecido como “ansiedade de autonomia” (KIM; KIM, 2025). Mesmo com o avanço de políticas públicas e incentivos governamentais, a ausência de uma rede de recarga bem planejada compromete a experiência dos usuários e limita o crescimento do setor. Além disso, o problema da alocação de estações de recarga envolve desafios adicionais, como a diversidade de padrões de conectores, níveis distintos de carregamento (CA e CC) e a variabilidade do comportamento de mobilidade urbana. Tais fatores tornam esse problema uma tarefa complexa e multidimensional, exigindo abordagens otimizadas que considerem múltiplos critérios técnicos, econômicos e logísticos ((WU *et al.*, 2024), (SAVARI *et al.*, 2023), (AGGARWAL; KUMAR; GOPE, 2021)).

A alocação das estações de carregamento é um assunto complexo que demanda uma perspectiva multidisciplinar, na qual a Engenharia de Produção tem um papel essencial. Nesse sentido, envolve a otimização de recursos, o planejamento da infraestrutura e a avaliação dos impactos econômicos e ambientais. Uma administração eficaz dessa alocação beneficia o sistema de transporte, diminui os custos operacionais e melhora a satisfação do usuário. Além disso, poderá haver uma integração com fontes de energia renovável, com o objetivo de tornar o sistema de transporte mais sustentável e eficiente. Diante desse cenário, este trabalho propõe um modelo de alocação de estações de carregamento que considera diferentes tipos de conectores e carregadores, com o objetivo de maximizar a cobertura da demanda e minimizar os custos operacionais. A proposta é implementada por meio de um algoritmo heurístico, testado em diversas instâncias com dados sintéticos e reais, visando contribuir para o planejamento eficiente de infraestrutura de recarga no contexto brasileiro.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de aprimorar a infraestrutura de recarga de veículos elétricos (VEs), considerando aspectos técnicos, econômicos e operacionais. Savari *et al.* (2023) realizaram uma revisão abrangente sobre as tecnologias de carregamento, a infraestrutura disponível e os desafios associados à instalação de estações. Os autores destacam que, embora as estações de carregamento rápido em corrente contínua (CC) apresentem custos de construção mais elevados em comparação às de corrente alternada (CA), são preferidas por oferecerem tempos de recarga significativamente menores. O estudo também ressalta a importância da compatibilidade entre os conectores e os veículos, e propõe classificações de estações com base na autonomia oferecida: nível 1 para até 10 km, nível 2 para cerca de 50 km, nível 3 para 100 km, e nível 4 (carregamento rápido em CC) para até 200 km.

Wu *et al.* (2024) propuseram um modelo de otimização robusto para a alocação de estações públicas de recarga, considerando incertezas na demanda. O modelo incorpora a variabilidade no fluxo de tráfego urbano e utiliza a teoria das filas (modelo M/G/m/m) para estimar perdas, permitindo uma alocação mais confiável e realista em cenários urbanos complexos. Yi *et al.* (2022) adotaram uma abordagem baseada em dados para estimar a demanda por recarga, utilizando trajetórias de mobilidade urbana combinadas com o algoritmo PageRank modificado. A metodologia identificou regiões com maior potencial de uso e aplicou os dados em um modelo de cobertura máxima com capacidade (CMCLP), resultando em uma disposição espacial mais eficiente das estações.

Na perspectiva de fatores socioeconômicos, Kim e Kim (2025) utilizaram modelos estatísticos para analisar as variáveis que influenciam a localização de estações de carregamento rápido na região metropolitana de Seul. Os autores concluíram que o volume de tráfego, por si só, não é um fator determinante, reforçando a importância de uma análise empírica e multifatorial para orientar políticas públicas de infraestrutura. Em Silva e Mestria (2019) foram desenvolvidos algoritmos metaheurísticos para resolver o problema de localização de estações de recarga, buscando minimizar os custos de instalação e deslocamento. Aplicados a dados reais, os modelos apresentaram bons resultados em termos de tempo computacional e eficiência da solução.

Em conjunto, esses trabalhos evidenciam a relevância de integrar dados reais de mobilidade, modelos matemáticos avançados e características técnicas dos carregadores no planejamento da infraestrutura de recarga. A presente pesquisa avança nesse cenário ao

propor um modelo que incorpora a diversidade de conectores e níveis de potência, adaptando-se às peculiaridades do mercado brasileiro de veículos elétricos.

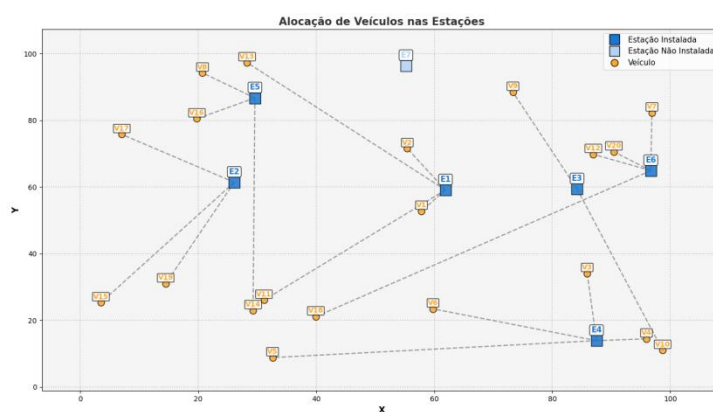
3. TIPOS DE CONECTORES

A padronização dos conectores de recarga de veículos elétricos (VEs) é essencial para assegurar a compatibilidade entre infraestrutura e diferentes modelos de veículos. Os conectores variam conforme a capacidade de potência, tipo de corrente (CA ou CC) e região geográfica, sendo definidos por normas como IEC 62196, SAE J1772 e GB/T. Este trabalho considera sete conectores: Type 1 (até 19,2 kW), Type 2 (até 43 kW), GB/T AC (até 27,7 kW), GB/T DC (até 237 kW), CCS1 e CCS2 (acima de 350 kW), e CHAdeMO (até 400 kW, com suporte a V2G). A diversidade de padrões ainda representa um desafio, mas avanços tecnológicos têm possibilitado estações universais, promovendo maior interoperabilidade entre veículos e redes.

4. FORMULAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Para ilustrar a aplicação do modelo de otimização proposto, foi desenvolvida uma instância de pequeno porte composta por 7 estações de carregamento e 20 veículos elétricos, cada um com localizações específicas em uma região plana e diferentes tipos de conectores.

Figura 1 – Mapa de alocação de veículos.



Fonte: Autores (2025).

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das estações e dos veículos em um plano cartesiano, considerando suas coordenadas (x, y). As estações possuem diferentes capacidades, tipos de conectores, custos de instalação e custos por porta, enquanto os veículos apresentam demandas associadas à potência de recarga e tipos de conectores compatíveis. Este exemplo permite demonstrar o funcionamento do modelo, desde a leitura dos dados de

entrada até a alocação dos veículos nas estações compatíveis, considerando restrições operacionais e minimizando o custo total da rede de recarga. Os dados das Tabelas 1 e 2 apresentam as informações detalhadas de entrada da instância utilizada, incluindo a localização (coordenadas), o tipo de conector e a potência dos veículos, bem como as características técnicas e econômicas das estações de carregamento.

Tabela 1 – Veículos.

ID	Coordenadas (x, y)	Tipo Conector	Potência (kW)
1	(57.83, 52.76)	Tipo1	7.4
2	(55.43, 71.53)	CCS2	7.4
3	(85.92, 34.09)	Tipo2	7.4
4	(95.97, 14.44)	Tipo2	7.4
5	(32.59, 8.82)	Tipo2	7.4
6	(59.78, 23.43)	Tipo2	7.4
7	(96.89, 82.26)	Tipo2	7.4
8	(20.71, 94.22)	Tipo2	11.0
9	(73.33, 88.45)	Tipo2	11.0
10	(98.70, 11.03)	CCS2	11.0
11	(31.12, 26.04)	GB/T_AC	11.0
12	(86.96, 69.80)	GB/T_DC	60.0
13	(28.27, 97.31)	GB/T_DC	60.0
14	(29.29, 22.95)	CCS1	30.0
15	(3.50, 25.30)	CCS2	30.0
16	(19.77, 80.48)	Tipo2	30.0
17	(7.04, 75.77)	CCS2	30.0
18	(39.92, 21.09)	WALL EURO	7.4
19	(14.47, 30.97)	CCS2	7.4
20	(90.44, 70.56)	CHAdemo	50.0

Fonte: Autores (2025).

Tabela 2 Estações de carregamento.

ID	Coordenadas (x, y)	Conectores Disponíveis	Máx. Portas	Tipo	Potência (kW)	Custo/Porta	Custo Instalação
1	(61.9, 59.1)	Tipo1, GB/T_AC, GB/T_DC, CCS2, CHAdemo	5	DC	500.0	25.72	22.0
2	(26.1, 61.4)	CCS2	4	DC	400.0	50.00	40.0
3	(84.2, 59.4)	Tipo1, Tipo2, CCS2	4	DC	400.0	18.00	16.33
4	(87.5, 13.9)	Tipo2	4	AC	44.0	3.00	5.0
5	(29.6, 86.7)	Tipo2, CCS1	6	DC	300.0	19.50	17.5
6	(96.7, 64.9)	Tipo2, GB/T_DC, CCS1, CCS2, CHAdemo	6	DC	600.0	27.50	23.17
7	(55.2, 96.4)	CCS2, WALL EURO	4	DC	400.0	26.00	22.0

Fonte: Autores (2025).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais e métodos utilizados para a resolução do problema de alocação otimizada de veículos elétricos (VEs) em estações de carregamento

com diversidade de conectores. A proposta envolve o desenvolvimento de um algoritmo heurístico em linguagem Python, que realiza a alocação considerando critérios de compatibilidade entre tipos de conectores, limitações de capacidade das estações e distância geográfica entre veículos e estações. Os dados de entrada são organizados em arquivos TXT contendo as características técnicas e geográficas dos veículos e das estações candidatas. Cada estação possui uma localização, conjunto de conectores compatíveis, limite máximo de portas de recarga, tipo (CA ou CC), potência total disponível e custos associados à instalação e operação. Já os veículos são definidos por coordenadas (x, y), tipo de conector e demanda de potência.

O processo de alocação visa minimizar os custos de infraestrutura, garantindo o atendimento de todos os veículos com base na menor distância e compatibilidade técnica. A seguir, são detalhadas as etapas da implementação: o pseudocódigo do algoritmo, o modelo matemático utilizado e os cenários simulados com diferentes taxas de penetração de veículos elétricos.

5.1 Pseudocódigo

O pseudocódigo apresentado nas Figuras 2, 3 e 4 nesta subseção descreve a lógica central do algoritmo heurístico desenvolvido para alocação de veículos elétricos em estações de recarga. O método realiza uma busca sequencial por estações compatíveis e disponíveis, atribuindo cada veículo à estação mais próxima com conectores compatíveis e portas livres. A estratégia visa respeitar as restrições técnicas e operacionais de cada instalação, minimizando a distância percorrida e otimizando a utilização da infraestrutura.

Figura 2 – Pseudocódigo parte 1.

```
INÍCIO
Para cada arquivo de entrada .txt na pasta:
    # --- Leitura dos dados ---
    Abrir arquivo de entrada
    Inicializar listas: veiculos = [], estacoes = []
    Para cada linha do arquivo:
        Se linha indica início da seção de veículos:
            lendo_veiculos = True
            lendo_estacoes = False
        Se linha indica início da seção de estações:
            lendo_veiculos = False
            lendo_estacoes = True
        Se lendo_veiculos:
            Ler id, x, y, tipo_conector, potencia
            Adicionar dicionário do veículo à lista veiculos
        Se lendo_estacoes:
            Ler id, x, y, conectores, max_portas, tipo, potencia, custo_por_porta, custo_instalacao
            Adicionar dicionário da estação à lista estacoes
```

Fonte: Autores (2025).

Figura 3 – Pseudocódigo Parte 2.

```
# --- Alocação dos veículos ---
Inicializar: solucao = [], veiculos_alocados = set(), custo_total = 0, consumo_max = 0
Para cada estação em estacoes:
    Criar estrutura de portas disponíveis (ex: {1: [], 2: [], ...})

Para cada veículo em veiculos:
    melhor_estacao = None
    melhor_porta = None
    menor_dist = infinito
    Para cada estação em estacoes:
        Se tipo_conector do veículo está nos conectores da estação:
            Para cada porta da estação:
                Se porta está vazia:
                    Calcular distância entre veículo e estação
                    Se distância < menor_dist:
                        menor_dist = distância
                        melhor_estacao = estação
                        melhor_porta = porta
            Parar busca de portas (só precisa de uma livre)
    Se melhor_estacao e melhor_porta encontrados:
        Alocar veículo na porta da estação
        Adicionar id do veículo em veiculos_alocados
        Atualizar custo da estação: custo_por_porta * portas ocupadas + custo_instalacao
        Atualizar potencia_total da estação
        Atualizar consumo_max se necessário
```

Fonte: Autores (2025).

Figura 4 – Pseudocódigo Parte 3.

```
# --- Montar solução final ---
Para cada estação:
    Se possui pelo menos uma porta ocupada:
        Adicionar à lista solucao
        Somar custo_total

# --- Verificar veículos não alocados ---
Se existe veículo não alocado:
    Exibir mensagem de erro com os ids e dados dos veículos não alocados
    Encerrar execução

# --- Exibir resultados no terminal ---
Para cada estação na solução:
    Exibir id, posição, portas instaladas, custo, potência total
    Para cada porta ocupada:
        Exibir veículos alocados

Calcular e exibir:
    Total de estações instaladas
    Total de portas instaladas
    Custo total (em mil US$)
    Consumo máximo (kW)
    Tempo computacional

# --- Salvar resultados em planilha Excel ---
Perguntar ao usuário se deseja salvar resultados em planilha
Se sim:
    Criar planilha Excel
    Adicionar tabela detalhada das estações
    Adicionar tabela de resumo dos resultados
    Adicionar tabela de tipos de conectores
    Salvar arquivo

# --- Visualizar plano cartesiano ---
Perguntar ao usuário se deseja visualizar o plano cartesiano
Se sim:
    Plotar gráfico com estações (instaladas e não instaladas) e veículos
    Traçar linhas entre veículos e estações alocadas
```

FIM

Fonte: Autores (2025).

5.2 Formulação Matemática

Para complementar a implementação computacional, foi desenvolvida uma formulação matemática que modela o problema como um programa de otimização discreta. A

modelagem considera os conjuntos de veículos e estações, as variáveis de decisão binárias que representam a alocação, os custos envolvidos e as restrições de compatibilidade e capacidade. Essa formulação serve como base teórica para a validação da heurística e para possíveis extensões futuras com métodos exatos ou metaheurísticos.

5.2.1 CONJUNTOS E PARÂMETROS

Esta subseção define os principais conjuntos e parâmetros utilizados na formulação matemática do problema. O conjunto de veículos elétricos representa a demanda por recarga, enquanto o conjunto de estações representa a infraestrutura candidata à instalação. Os parâmetros contemplam custos, distâncias, tipos de conectores e capacidades técnicas, refletindo a diversidade de equipamentos e a variabilidade geográfica e energética envolvida na alocação.

- I: conjunto de veículos elétricos.
- J: conjunto de estações de carregamento.
- C_j : custo de instalação da estação j .
- c_{ij} : distância entre veículo i e estação j .
- T_i : tipo de conector do veículo i .
- T_j : conjunto de conectores disponíveis na estação j .
- P_i : potência requerida pelo veículo i .
- K_j : número máximo de portas na estação j .
- L_j : potência máxima da estação j .

5.2.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis de decisão na Figura 5 modelam o processo de alocação entre veículos e estações. São utilizadas variáveis binárias para indicar se um veículo foi atribuído a uma determinada estação, e se uma estação foi ativada na solução final. Essas variáveis permitem representar computacionalmente a configuração da rede de recarga otimizada, respeitando as limitações operacionais e de compatibilidade técnica.

Figura 5 – Variáveis de Decisão.

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{se a estação } j \text{ for ativada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$
$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } i \text{ for alocado à estação } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Fonte: Autores (2025).

5.2.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo na Figura 6 busca minimizar o custo total da infraestrutura implantada, considerando os custos fixos de instalação das estações e os custos variáveis associados ao número de portas de recarga instaladas. Esse critério reflete o interesse em promover uma solução economicamente eficiente, mantendo a cobertura de demanda e a compatibilidade entre veículos e unidades de recarga.

Figura 6 – Função objetivo.

$$\min \sum_{j \in J} C_j x_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} y_{ij}$$

Fonte: Autores (2025).

5.2.4 RESTRIÇÕES

As restrições na Figura 7 garantem a viabilidade técnica da solução proposta. Elas asseguram que cada veículo seja alocado a uma única estação compatível, que a capacidade máxima de portas e potência das estações não seja excedida, e que os tipos de conectores estejam adequadamente compatíveis. É verificado que para cada conector T_i do veículo i deve pertencer ao conjunto de conectores T_j disponíveis na estação j . Com isso, o modelo assegura a integridade operacional e técnica do sistema de recarga planejado.

Figura 7 – Restrições.

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J: T_i \in T_j} y_{ij} &= 1, & \forall i \in I \\ \sum_{i \in I} y_{ij} &\leq K_j \cdot x_j, & \forall j \in J \\ \sum_{i \in I} P_i y_{ij} &\leq L_j, & \forall j \in J \\ y_{ij} &\leq x_j, & \forall i \in I, j \in J \\ x_j, y_{ij} &\in \{0, 1\} \end{aligned}$$

Fonte: Autores (2025).

5.3 Taxa de penetração

Para avaliar a escalabilidade e a robustez do modelo proposto, foram simulados cenários progressivos de adoção de veículos elétricos (VEs), refletindo o aumento da penetração dessa tecnologia ao longo dos anos. Essa análise permite examinar o comportamento do sistema diante da crescente demanda por recarga, identificando o impacto no número de estações necessárias, no custo total e na capacidade instalada.

A Tabela 3 apresenta uma projeção de crescimento anual da frota de VEs, considerando o ano de 2025 como base. A cada novo ano, 50 veículos adicionais são inseridos no sistema, simulando o avanço gradual da eletromobilidade. A taxa de penetração, expressa na primeira coluna, representa o percentual de aumento em relação ao ano base. As simulações foram conduzidas com um conjunto fixo de 150 estações candidatas, permitindo avaliar até que ponto essa infraestrutura é capaz de suportar a expansão da demanda.

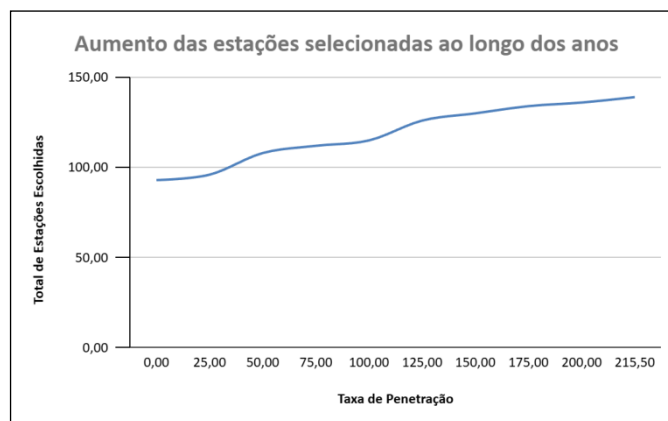
Tabela 3 – Resultados para a taxa de penetração.

Ano	%	Instâncias	Número de Veículo	Total de Estações Escolhidas
2025	0,00	200VE150ES	200	93
2026	25,00	250VE150ES	250	96
2027	50,00	300VE150ES	300	108
2028	75,00	350VE150ES	350	112
2029	100,00	400VE150ES	400	115
2030	125,00	450VE150ES	450	126
2031	150,00	500VE150ES	500	130
2032	175,00	550VE150ES	550	134
2033	200,00	600VE150ES	600	136
2034	215,50	631VE150ES	631	139

Fonte: Autores (2025)

A análise mostra que, até o ano de 2033, o conjunto de 150 estações candidatas é capaz de atender integralmente à demanda crescente. No entanto, a partir de 2034, observa-se um limite estrutural: o sistema atinge sua capacidade máxima, e a continuidade da expansão exigiria a inclusão de novas estações. Esse ponto de ruptura é crucial para o planejamento futuro, indicando a necessidade de antecipação na expansão da infraestrutura. Para complementar a análise, a Figura 8 ilustra a evolução do número de estações selecionadas ao longo dos anos simulados. A curva crescente evidencia a necessidade de expansão proporcional da rede de recarga frente ao avanço da frota elétrica, reforçando a importância do planejamento estratégico baseado em projeções realistas de penetração de VEs.

Figura 8 – Gráfico do Aumento das estações selecionadas ao longo dos anos.



Fonte: Autores (2025)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do algoritmo de alocação desenvolvido, considerando diferentes cenários compostos por conjuntos de veículos elétricos e estações de recarga com variadas configurações de conectores, potências e custos. As simulações foram realizadas com base em arquivos de entrada contendo a descrição completa dos veículos e estações, como coordenadas geográficas, tipo de conector, potência requerida/ofertada, número máximo de portas e custos envolvidos na instalação.

O algoritmo foi testado em múltiplas instâncias, avaliando-se métricas relevantes como:

- O número total de estações ativadas;
- A quantidade de portas de carregamento utilizadas;
- O custo total da infraestrutura implantada (considerando custo fixo por porta e custo de instalação);
- A potência total instalada nas estações;
- O tempo computacional necessário para encontrar a solução;
- A capacidade do algoritmo de alocar todos os veículos com sucesso, respeitando as restrições de compatibilidade e limite de capacidade.

Adicionalmente, os resultados foram apresentados em planilhas estruturadas e visualizações gráficas em plano cartesiano, permitindo observar a distribuição espacial da solução gerada. As análises destacam o comportamento do algoritmo frente a diferentes tamanhos de instâncias, bem como a eficiência e robustez da abordagem adotada. A seguir, são detalhados os cenários avaliados e os respectivos resultados.

6.1 Primeiro Conjunto de Instâncias

Nesta primeira instância, foram utilizados dados reais obtidos da plataforma PlugShare, que mapeia pontos de recarga disponíveis na Região Metropolitana da Grande Vitória (PLUGSHARE, 2025). Os veículos foram gerados aleatoriamente com base em padrões de distribuição urbana e diversidade de conectores. O objetivo foi verificar a capacidade do modelo de se adaptar a um cenário realista, com variações de localização, tipos de conectores e potências. Os resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5 demonstram a viabilidade da alocação completa dos veículos com custo reduzido e tempo computacional mínimo.

Tabela 4 – Resultados para Cenário da Grande Vitória.

Instância	Número de Veículos	Total de Estações de Carregamento	Número de Carregadores	Total de Estações Escolhidas	Função Objetivo (Custo Total, mil US\$)	Total de Potências Instalada (kW)	Tempo Computacional
-----------	--------------------	-----------------------------------	------------------------	------------------------------	---	-----------------------------------	---------------------

108VE69 ES	108	69	108	69	4906	1360.8	0.01
---------------	-----	----	-----	----	------	--------	------

Fonte: Autores (2025).

Tabela 5 – Detalhamento do número de carregadores da Grande Vitória.

Instância	Type 2	CCS2	CHAdemo
108VE69ES	93	14	1

Fonte: Autores (2025).

6.2 Segundo Conjunto de Instâncias

A segunda instância representa uma projeção de cenários futuros para a mesma região da Grande Vitória, simulando uma expansão gradativa da frota elétrica ao longo dos anos, Tabelas 6 e 7. Foram considerados diferentes volumes de veículos e estações para refletir uma possível evolução da mobilidade elétrica urbana. Essa análise permite avaliar o comportamento do modelo sob pressão de demanda, evidenciando sua escalabilidade e capacidade de manter a eficiência de alocação mesmo em cenários com alta penetração de veículos elétricos.

Tabela 6 – Resultados para cenário da Grande Vitória expandida.

Instância	Número de Veículos	Total de Estações de Carregamento	Número de Carregadores	Total de Estações Escolhidas	Função Objetivo (Custo Total, mil US\$)	Total de Potências Instaladas (KW)	Tempo Computacional
145VE85ES	145	85	145	85	7136	5225	8.76
157VE109ES	157	109	157	109	8393	5987.8	5.97
167VE119ES	167	119	167	119	9033	6487	5.63
195VE172ES	195	154	195	135	7533	6092.00	16.58
256VE163ES	256	163	256	163	9052	8615.20	15.93
266VE159ES	266	159	266	159	9533	7587.8	6.68
286VE182ES	286	182	286	175	9848	8807.80	11.08
316VE192ES	316	192	316	190	11688	10307.80	48.93

Fonte: Autores (2025).

Tabela 7 – Detalhamento do número de carregadores.

Instância	Type 2	CCS2	CHAdemo
145VE85ES	92	52	1
157VE109ES	92	54	11
167VE119ES	92	54	21
195VE154ES	138	54	31
256VE163ES	183	52	21
266VE159ES	191	54	21
288VE182ES	211	54	21
316VE192ES	211	74	31

Fonte: Autores (2025).

6.3 Terceiro Conjunto de Instâncias

Na terceira instâncias mostradas nas Tabelas 8 e 9 foram criadas uma região plana artificial com características semelhantes à Região Metropolitana da Grande Vitória que possui uma área de aproximadamente 2.324 km², englobando os principais municípios da Região Metropolitana da Grande Vitória, conforme dados do IBGE (2025).

Tabela 8 – Resultados para um cenário semelhante a Região Metropolitana da Grande Vitória.

Instância	Número de Veículos	Total de Estações de Carregamento	Número de Carregadores	Total de Estações Escolhidas	Função Objetivo (Custo Total, mil US\$)	Total de Potências Instalada (KW)	Tempo Computacional
50VE20ES	50	20	50	16	1363.86	4646.00	0.00
93VE20ES	93	20	93	20	2498.00	5913.40	0.01
100VE30ES	100	30	100	29	2769.54	6400.40	0.01
105VE30ES	105	30	105	29	2963.61	7360.40	0.01
150VE40ES	150	40	150	39	4126.56	11067.40	0.01
164VE40ES	164	40	164	40	4266.59	11155.40	0.01
200VE50ES	200	50	200	50	5927.33	13651.40	0.01
210VE50ES	210	50	210	50	5975.93	13651.40	0.01
250VE60ES	250	60	250	60	6676.74	15419.63	0.01
300VE70ES	300	70	300	65	8633.76	20693.40	0.02
350VE80ES	350	80	350	77	10447.63	24047.00	0.02
400VE90ES	400	90	400	88	12078.97	26923.60	0.02
450VE100ES	450	100	450	100	13386.31	29388.03	0.02

Fonte: Autores (2025).

Tabela 9 – Detalhamento do número de carregadores.

Instância	Type 1	Type 2	GBT/AC	GBT/DC	CCS1	CCS2	CHAdEM
50VE20ES	7	14	6	3	8	6	6
93VE20ES	14	25	20	13	6	9	6
100VE30ES	16	25	20	15	5	9	10
105VE30ES	16	25	20	15	10	9	10
150VE40ES	18	36	33	20	19	14	10
164VE40ES	18	36	33	22	22	23	10
200VE50ES	32	44	29	29	27	25	14
210VE50ES	35	44	30	30	27	30	14
250VE60ES	46	57	39	36	32	27	13
300VE70ES	43	63	43	43	43	43	22
350VE80ES	50	70	50	50	50	50	30
400VE90ES	58	78	58	58	58	58	32
450VE100ES	64	80	78	64	60	60	44

Fonte: Autores (2025).

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um modelo de alocação otimizada de veículos elétricos em estações de recarga com diferentes tipos de conectores, considerando características técnicas e

operacionais da infraestrutura. A abordagem, implementada em Python, demonstrou ser eficaz ao garantir a alocação completa dos veículos, respeitando os limites de capacidade das estações e a compatibilidade dos conectores. Os resultados evidenciaram boa escalabilidade e baixo tempo computacional, mesmo em instâncias com grande volume de dados, o que reforça o potencial de aplicação prática da proposta.

Como trabalhos futuros, sugere-se investigar aspectos elétricos associados à alta penetração de veículos na rede, como flutuações de tensão, perdas técnicas e qualidade da energia. Questões de segurança digital também devem ser consideradas, especialmente em sistemas inteligentes com troca bidirecional de dados. Além disso, recomenda-se explorar o uso de fontes renováveis e a integração com tecnologias como o Vehicle-to-Grid (V2G), que podem ampliar a sustentabilidade da mobilidade elétrica (AGGARWAL; KUMAR; GOPE, 2021).

AGRADECIMENTOS

O projeto foi parcialmente suportado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, chamada n. 18/2024, Bolsas de Produtividade do CNPq e pelo projeto número PJ5526 (Métodos de Otimização para Planejamento de Facilidades) no edital Ifes/PRPPG 03/2024 Pibic e Pibiti.

REFERÊNCIAS

ACHARIGE, SITHARA S. G. *et al.* Review of electric vehicle charging technologies, standards, architectures, and converter configurations. **IEEE Access**, vol. 11, p. 41218-41255, 2023.

AGGARWAL, S.; KUMAR, N.; GOPE, P. An Efficient Blockchain-Based Authentication Scheme for Energy-Trading in V2G Networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 17, n. 10, p. 6971–6980, 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área de Unidade Territorial**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sintese/es?indicadores=29167>. Acesso em: 25 Jun 2025.

KIM, H.; KIM, G. S. Factors Influencing Electric Vehicle Charging Station Locations and Policy Implications: Empirical Lessons from Seoul Metropolitan Area in Korea. **Sustainability**, vol. 17, n. 2, 745, 2025.

LACHVAJDEROVÁ, LAURA; KÁDÁROVÁ, JAROSLAVA. Analysis of internal combustion engine vehicle, battery electric vehicle and emissions from transport. **Transp. Logistics**, vol. 21, p. 21-33, 2021.

PLUGSHARE. **Mapa de estações de recarga para veículos elétricos**. Disponível em: <https://www.plugshare.com/br>. Acesso em: 30 abr. 2025.

SAVARI, GEORGE FERNANDEZ *et al.* Assessment of charging technologies, infrastructure and charging station recommendation schemes of electric vehicles: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, vol. 14, n. 4, p. 101938, 2023.

SILVA, Y. S.; MESTRIA, M. Algoritmos para o problema de localização de estações de carregamento de veículos elétricos. **Revista Produção Online**, vol. 19, n. 1, 290–320, 2019.

WU, T.; FAINMAN, E.; MAĪZI, Y.; SHU, J. e LI, Y. Allocate electric vehicles' public charging stations with charging demand uncertainty. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 130, 104178, 2024.

YI, Z.; LIU, X. C.; WEI, R. Electric vehicle demand estimation and charging station allocation using urban informatics. **Transportation Research Part D**, 106, 103264, 2022.