57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO PARA INFRAESTRUTURA DE RECARGA ELÉTRICA COM GEORREFERENCIAMENTO: UM ESTUDO APLICADO À GENERAL MOTORS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Dvison Willian Dias dos Santos
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, CEP: 12228-900
dvison.santos.101550@ga.ita.br

Jônatas Araújo de Almeida
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. Prof. Moraes Rego, 1235. Cidade Universitária, Recife - PE CEP: 50670-901
jonatas.almeida@ufpe.br

Níssia Carvalho Rosa Bergiante
Universidade Federal Fluminense (UFF)
R. Mario Santos Braga, 30 - Centro, Niterói - RJ, 24020-140
nissiabergiante@id.uff.br

RESUMO

A transição para veículos elétricos (VEs) é central para reduzir emissões de carbono. Este artigo propõe uma análise de custo-benefício, integrada com georreferenciamento, para a expansão da infraestrutura de recarga elétrica da General Motors (GM) em Pernambuco. A metodologia possui quatro etapas, coleta de dados de mercado, demografia e políticas públicas, análise georreferenciada com mapas de calor e clustering (DBSCAN), projeção de demanda e simulação de cenários com Python e @RISK e o cálculo de custo-benefício. Os resultados indicam que a frota de VEs em Pernambuco atingirá 1.100 veículos até 2025, exigindo investimentos entre R$ 6,2 milhões e R$ 8,8 milhões em infraestrutura e benefícios como redução de 2.200 toneladas de CO2/ano e aumento nas vendas de VEs. A análise alinha-se às políticas públicas locais, isenção de IPVA com o programa "Corredor Verde" e critérios ESG. Conclui-se que o investimento é viável, recomendando parcerias público-privadas e integração de energias renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Infraestrutura de recarga elétrica. Veículos elétricos. General Motors.

EN&OG – PO na Área de Energia; Óleo; OA – Outras aplicações em PO.

ABSTRACT

The transition to electric vehicles (EVs) is central to reducing carbon emissions. This paper proposes a dynamic cost-benefit analysis, integrated with georeferencing, for the expansion of General Motors' (GM) electric charging infrastructure in Pernambuco. The methodology has four steps: market, demographic, and public policy data collection, georeferenced analysis with heat maps and clustering (DBSCAN), demand projection and scenario simulation with Python and @RISK, and cost-benefit calculation. The results indicate that the EV fleet in Pernambuco will reach 1,100 vehicles by 2025, requiring investments between R$6.2 million and R$8.8 million in infrastructure and benefits such as a reduction of 2,200 tons of CO2/year and an increase in EV

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

sales. The analysis aligns with local public policies, exemption from IPVA with the "Corredor Verde" program, and ESG criteria. It is concluded that the investment is viable, recommending public-private partnerships and integration of renewable energies.

KEYWORDS: Electric charging infrastructure. Electric vehicles. General Motors.

EN&OG – PO in the Energy Area; Oil; OA – Other PO applications.

1. Introdução

A transição para veículos elétricos (VEs) tornou-se estratégia fundamental para reduzir emissões de carbono no setor automotivo [GM, 2021]. A General Motors, como outras montadoras globais, estabeleceu metas ambiciosas de neutralidade carbônica, dependendo criticamente do desenvolvimento de infraestrutura de recarga adequada [IEA, 2023]. Este estudo foca em Pernambuco, estado que vem implementando políticas ativas de incentivo à mobilidade elétrica, como isenção de IPVA e o programa "Corredor Verde" [Governo de PE, 2023].

Apesar do crescimento do mercado de VEs, a infraestrutura de recarga no Brasil ainda apresenta distribuição desigual e insuficiente [ABVE, 2023]. Pesquisas indicam que a disponibilidade de pontos de recarga é fator decisivo na adoção de VEs por consumidores [ZHANG et al., 2021]. Em Pernambuco, especificamente, a concentração urbana na Região Metropolitana do Recife cria desafios e oportunidades particulares para a expansão desta infraestrutura [IBGE, 2023]. Este artigo propõe uma metodologia integrada que combina análise de custo-benefício com técnicas de georreferenciamento espacial, garantindo decisões adaptáveis aos cenários futuros incertos e otimizando investimentos em infraestrutura de recarga ao longo do tempo. A abordagem utiliza ferramentas como *Quantum Geographic Information System* (QGIS), Sistemas de Informação Geográfica, para análise espacial e algoritmos de *clustering* como, *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN), para identificar padrões de demanda [WANG et al., 2019; CHEN et al., 2021]. Complementarmente, aplica-se simulação de Monte Carlo através do software @RISK para projetar cenários futuros [KIM et al., 2022].

A análise econômica considera tantos custos diretos (instalação, operação) quanto benefícios tangíveis e intangíveis, incluindo redução de emissões e aumento nas vendas de VEs [SMITH et al., 2020]. O estudo incorpora ainda a perspectiva ESG (*Environmental, Social, and Governance*), avaliando como os investimentos em infraestrutura de recarga podem gerar impactos positivos em múltiplas dimensões [IPCC, 2021]. Os resultados fornecem subsídios para decisões estratégicas tanto da General Motors (GM) quanto do poder público, indicando áreas prioritárias para investimento e o potencial retorno socioeconômico. A metodologia desenvolvida pode ser replicada em outros contextos regionais, contribuindo para o planejamento nacional de infraestrutura para VEs [ANEEL, 2023]. Este artigo está estruturado em quatro seções principais: (1) Referencial Teórico, que aborda os conceitos e estudos relacionados à infraestrutura de recarga elétrica e análise de custo-benefício; (2) Metodologia, que detalha as etapas e ferramentas utilizadas na análise; (3) Resultados e (4) Conclusão, que apresenta os achados e recomendações estratégicas para a GM e para o governo de Pernambuco.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Infraestrutura de Recarga Elétrica: Desafios e Oportunidades

A infraestrutura de recarga elétrica constitui-se como elemento fundamental para viabilizar a transição energética no setor de transportes [IEA, 2023]. O estudo de ZHANG et al [2021] demonstra que a disponibilidade de pontos de recarga influencia diretamente a decisão de compra de veículos elétricos, sendo fator crítico para adoção em massa.

Os principais desafios envolvem os elevados custos de implantação e a necessidade de integração com a rede elétrica existente [ANEEL, 2023]. Por outro lado, o desenvolvimento de tecnologias de recarga ultrarrápida e sistemas inteligentes de gestão energética apresentam-se como oportunidades relevantes [GM, 2021].

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

2.2. Georreferenciamento e Análise Espacial

As ferramentas de georreferenciamento, como QGIS e ArcGIS, permitem análises espaciais sofisticadas para planejamento de infraestrutura [WANG et al., 2019]. Esses sistemas possibilitam a integração de múltiplas camadas de informação, incluindo dados demográficos, de tráfego e de uso do solo.

Algoritmos de *clustering*, particularmente o DBSCAN, destacam-se na identificação de padrões espaciais e agrupamentos naturais de demanda [CHEN et al., 2021]. Neste estudo, essa abordagem permitirá detectar áreas com alta concentração de veículos elétricos e baixa oferta de infraestrutura de recarga.

2.3. Projeção de Demanda e Simulação de Cenários

A projeção precisa da demanda por infraestrutura de recarga requer modelos estatísticos robustos que considerem múltiplos cenários [KIM et al., 2022]. A simulação de Monte Carlo tem se mostrado particularmente eficaz para incorporar incertezas e variáveis complexas.Esses modelos permitem avaliar diferentes estratégias de expansão e seus impactos potenciais, considerando fatores como crescimento da frota de veículos elétricos e evolução tecnológica [SMITH et al., 2020]. A integração com dados em tempo real pode melhorar ainda mais a precisão das projeções.

2.4. ESG (*Environmental, Social, and Governance*) e sua Relação com a Mobilidade Elétrica

A análise ESG fornece um *framework* para avaliar os benefícios da mobilidade elétrica [IPCC, 2021]. No aspecto ambiental, destaca-se a redução de emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da qualidade do ar.

No pilar social, os investimentos em infraestrutura de recarga geram empregos diretos e indiretos, além de promover desenvolvimento econômico local [Governo de PE, 2023]. A dimensão de governança avalia a transparência e eficiência na alocação de recursos públicos e privados. Políticas públicas alinhadas a esses princípios aceleram a transição para uma economia de baixo carbono [IEA, 2023]. Programas como o "Corredor Verde" em Pernambuco exemplificam essa abordagem integrada, combinando objetivos ambientais, sociais e econômicos.

3. Procedimento Metodológico

A metodologia (Figura 1) foi estruturada em cinco etapas interligadas, com foco na análise espacial e econômica da infraestrutura de recarga para veículos elétricos (VEs) em Pernambuco.

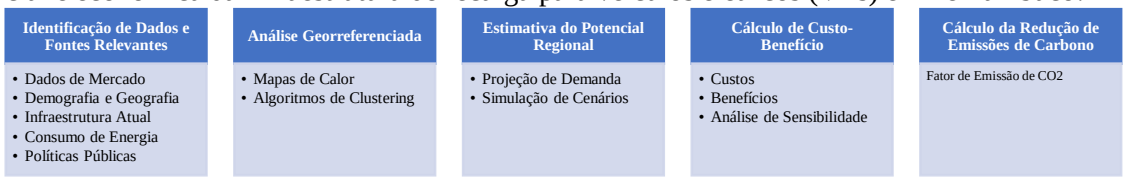


Figura 1. Etapas dos Resultados do Estudo

3.1. Identificação de dados e fontes relevantes

A primeira etapa consistiu na coleta e organização de dados essenciais para o planejamento da infraestrutura de recarga elétrica. Foram consideradas cinco categorias de dados: (1) dados de mercado, (2) demografia e geografia, (3) infraestrutura atual, (4) consumo de energia e (5) políticas públicas.

- **Dados de mercado**: Foram coletados dados sobre o número de veículos elétricos (VEs) registrados em Pernambuco, com base em relatórios da Associação Brasileira do Veículo Elétrico [ABVE, 2023]. Esses dados permitiram calcular as informações sobre o crescimento anual da frota de VEs e tendências de mercado.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

- **Demografia e Geografia:** Dados populacionais, de densidade demográfica e de renda média foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE, 2023], com foco na região metropolitana do Recife, que concentra a maior parte da população e da frota de VEs do estado.
- **Infraestrutura Atual:** Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL, 2023] incluíam informações sobre a localização e capacidade das estações de recarga existentes.
- **Consumo de Energia**: Dados sobre o consumo de energia e a capacidade da rede elétrica foram coletados da ANEEL, com ênfase na integração de fontes renováveis, como energia solar e eólica.
- **Políticas Públicas**: Informações sobre incentivos fiscais, como a isenção de IPVA para VEs, e programas de mobilidade elétrica foram obtidas do Governo de Pernambuco [2023].

3.2. Análise Georreferenciada

A segunda etapa focou na análise espacial dos dados coletados, utilizando ferramentas de georreferenciamento para identificar regiões prioritárias para a instalação de pontos de recarga.

- **Mapas de Calor**: Foram criados mapas de calor utilizando o software QGIS, que permitiu visualizar a densidade de VEs e a disponibilidade de pontos de recarga em diferentes regiões de Pernambuco. Esses mapas cruzaram dados de densidade populacional, renda média e infraestrutura existente.
- **Algoritmos de *Clustering***: O algoritmo DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) foi aplicado para identificar agrupamentos espaciais de alta densidade de VEs, utilizando a biblioteca Geopandas do Python. Essa abordagem permitiu priorizar áreas com alta demanda e baixa oferta de pontos de recarga.
- **Ferramentas Utilizadas**: QGIS, Python.

3.3. Estimativa do Potencial Regional

A terceira etapa envolveu a projeção de demanda e a simulação de cenários futuros para avaliar o potencial regional de expansão da infraestrutura de recarga.

- **Projeção de Demanda**: Um modelo de regressão linear foi aplicado para projetar o crescimento da frota de VEs até final de 2025, utilizando dados históricos da ABVE [2023], últimos dados publicados pela ABVE. O trabalho foi discutido apenas na projeção da frota de 2025. O modelo foi implementado em Python, com a biblioteca Scikit-learn.
- **Simulação de Cenários**: A ferramenta @RISK foi utilizada para realizar simulações de Monte Carlo, considerando variáveis como a taxa de crescimento da frota de VEs, o custo de instalação e a tarifa de energia elétrica. Foram gerados 10.000 cenários probabilísticos para avaliar a variabilidade dos resultados.
- **Ferramentas Utilizadas**: Python (Scikit-learn), @RISK.

3.4. Cálculo de Custo-Benefício

A quarta etapa consistiu em uma análise econômica, comparando os custos e benefícios associados à expansão da infraestrutura de recarga.

- **Custos**: Foram considerados os custos de investimento inicial (equipamentos, instalação e infraestrutura de suporte), custos operacionais (energia elétrica, mão de obra e software) e custos de manutenção (reparos e atualizações tecnológicas).
- **Benefícios**: Os benefícios incluíram a redução de emissões de carbono, o aumento nas vendas de VEs e a receita direta proveniente de taxas de uso das estações de recarga.
- **Análise de Sensibilidade**: Utilizando o @RISK, foi realizada uma análise de sensibilidade para identificar as variáveis que mais impactam o custo total, como a taxa de crescimento da frota de VEs e a tarifa de energia elétrica.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

- **Ferramentas Utilizadas**: Excel, Tableau, @RISK.

3.5. Fator de Emissão de CO2

Com base no IPCC [2021], foi utilizado um fator de emissão de 2 toneladas de CO2 por veículo a combustão por ano. Esse fator foi aplicado à projeção de frota de VEs em Pernambuco para calcular a redução de emissões.

4. Apresentação dos Resultados

4.1. Identificação de Dados e Fontes Relevantes

4.1.1. Dados de Mercado

Os dados de mercado (Tabela 1), referem-se ao número de veículos elétricos (VEs) registrados no estado de Pernambuco, bem como às tendências de crescimento da frota elétrica. Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico [ABVE, 2023], o estado de Pernambuco possui uma frota crescente de VEs, impulsionada por incentivos fiscais e pela expansão da infraestrutura de recarga na região metropolitana do Recife.

Tabela 1. Número de VEs registrados no Estado de Pernambuco

Ano	Número de VEs Registrados	Crescimento Anual (%)
2020	150	-
2021	220	46,7%
2022	350	59,1%
2023	520	48,6%

Fonte: ABVE [2023]

Tabela 2. Densidade Populacional de Pernambuco/PE

Região	População (2023)	Densidade Populacional (hab/km²)	Renda Média (R$)
Recife (Capital)	1.653.461	7.039	2.800
Região Metropolitana	3.887.261	1.200	2.200
Interior	5.712.738	45	1.500

Fonte: IBGE [2023]

4.1.2. Demografia e Geografia

A demografia e a geografia são fatores críticos para o planejamento da infraestrutura de recarga, pois influenciam a distribuição espacial da demanda. Pernambuco possui uma população de aproximadamente 9,6 milhões de habitantes, com uma densidade populacional média de 89,6 hab/km². A região metropolitana do Recife concentra cerca de 40% da população do estado, sendo a área com maior potencial para a instalação de pontos de recarga, conforme Tabela 2.

4.1.3. Infraestrutura Atual

A infraestrutura atual de recarga elétrica em Pernambuco ainda está em fase de expansão. De acordo com a ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023], o estado possui 32 pontos de recarga públicos, concentrados principalmente na região metropolitana do Recife. A Tabela 3 detalha a distribuição desses pontos por região.

Tabela 3. Quantidade de pontos de Recarga em Pernambuco

Região	Número de Pontos de Recarga	Tipo de Recarga
Recife (Capital)	20	Rápida e Semirrápida
Região Metropolitana	10	Semirrápida
Interior (demais regiões não metropolitanas)	2	Lenta

Fonte: ANEEL [2023]

Tabela 4. Consumo médio de energia em Pernambuco

Setor	Consumo de Energia (GWh/ano)	Participação (%)
Residencial	5.200	35%
Comercial	3.800	25%
Industrial	4.500	30%
Transportes	1.500	10%

Fonte: ANEEL [2023]

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

4.1.4. Consumo de Energia

O consumo de energia é um fator crucial para dimensionar a capacidade da rede elétrica e garantir que a infraestrutura de recarga seja sustentável. Pernambuco possui uma capacidade instalada de geração de energia de 4.500 MW, com uma participação significativa de fontes renováveis, como eólica e solar. A Tabela 4 apresenta o consumo médio de energia por setor no estado.

4.1.5. Políticas Públicas

As políticas públicas são um fator determinante para o crescimento da frota de veículos elétricos e a expansão da infraestrutura de recarga. Em Pernambuco, o governo estadual tem implementado incentivos fiscais, como a isenção do IPVA para VEs, e parcerias com empresas privadas para instalação de pontos de recarga. Além disso, o estado faz parte do Programa Nacional de Mobilidade Elétrica, que prevê investimentos em infraestrutura de recarga até final de 2025 [ANEEL, 2023]. A Tabela 5 resume as políticas públicas relacionadas a VEs em PE.

Tabela 5. Políticas Públicas relacionadas a Veículos Elétricos em Pernambuco

Política	Descrição	Impacto Esperado
Isenção de IPVA para VEs	Redução de custos para proprietários de veículos elétricos.	Aumento na adoção de VEs.
Parcerias público-privadas	Incentivos para empresas instalarem pontos de recarga.	Expansão da infraestrutura.
Programa Nacional de Mobilidade Elétrica	Investimentos em infraestrutura de recarga e incentivos fiscais.	Integração nacional da rede de recarga.

Fonte: Governo de Pernambuco [2023]

A coleta de dados para o estado de Pernambuco revelou um cenário promissor para a expansão da infraestrutura de recarga elétrica. A região metropolitana do Recife, com sua alta densidade populacional e renda média elevada, emerge como a área prioritária para investimentos. No entanto, o interior do estado também apresenta oportunidades, especialmente em cidades médias que estão começando a adotar veículos elétricos. A infraestrutura atual, embora limitada, está em expansão, com foco em recarga rápida e semirrápida. O consumo de energia, aliado à participação significativa de fontes renováveis, sugere que a rede elétrica do estado tem capacidade para suportar a demanda adicional gerada pelos VEs, o que também pode ser um tema para futuros estudos. Por fim, as políticas públicas em vigor criam um ambiente favorável para o crescimento da mobilidade elétrica, com incentivos fiscais e parcerias que devem acelerar a instalação de pontos de recarga nos próximos anos.

4.2. Análise Georreferenciada: Mapas de Calor e *Clustering* para Identificação de Regiões Prioritárias em Pernambuco

Com os dados populacionais analisados, para seguir com o estudo, foi realizado a análise georreferenciada da região de Pernambuco. Para a realização desta análise, foram considerados os seguintes dados:

- Localização dos pontos de recarga de veículos elétricos (VEs) em Pernambuco: De acordo com a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), até março de 2021, Pernambuco possuía aproximadamente 1,72% dos eletropostos públicos e semipúblicos do Brasil, o que correspondia a cerca de 8 pontos de recarga no estado [ABVE, 2021]
- Crescimento da infraestrutura de recarga: Iniciativas como o "Corredor Verde" da Neoenergia preveem a instalação de 120 pontos de recarga ao longo de seis capitais do Nordeste, incluindo Recife, com previsão de conclusão até o final do segundo semestre de 2025 [Neonergia, 2025].

Utilizando o software QGIS, foram realizados os seguintes procedimentos:

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

- Mapeamento dos pontos de recarga existentes: Com base nos dados disponíveis, foram georreferenciados os locais dos pontos de recarga em Pernambuco.
- Criação de mapa de calor: Foi gerado um mapa de calor para visualizar a concentração espacial dos pontos de recarga no estado.
- Aplicação do algoritmo de *clustering* DBSCAN: Este algoritmo foi utilizado para identificar agrupamentos de alta densidade de pontos de recarga, destacando regiões prioritárias para investimentos futuros.

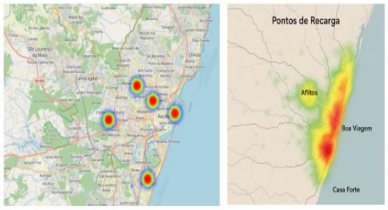


Figura 2. Mapa de Calor do Estado de Pernambuco com os pontos de concentração de Recarga Elétrica gerado pelo QGIS

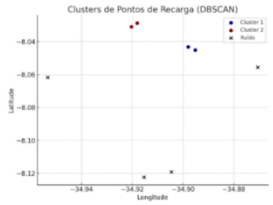


Figura 3. Clusters principais de pontos de recarga de veículos elétricos em Recife, Pernambuco, gerado pelo software DBSCAN

O mapa de calor gerado (Figura 2) evidencia uma maior concentração de pontos de recarga na região metropolitana do Recife, especialmente em bairros como Boa Viagem, Aflitos e Casa Forte. Essas áreas apresentam alta densidade de infraestrutura de recarga, indicando um foco inicial de investimentos nessas localidades.

Dividindo a região do mapa em *Clusters* temos os pontos abaixo de acordo com o *Clustering* dos pontos de recarga utilizando o software DBSCAN. A aplicação do algoritmo DBSCAN revelou três *clusters* principais de pontos de recarga:

- *Cluster* 1: Região de Boa Viagem (em Recife), caracterizada por uma alta concentração de pontos de recarga, possivelmente devido à presença de shoppings e centros comerciais que oferecem esse serviço.
- *Cluster* 2: Área dos Aflitos, onde há uma densidade moderada de pontos de recarga, indicando um crescimento na adoção de VEs nessa região.
- *Cluster* 3: Zona de Casa Forte, com uma concentração emergente de pontos de recarga, sugerindo potencial para futuros investimentos.

O resultado da análise DBSCAN revelou três *clusters* principais de pontos de recarga de veículos elétricos em Recife, Pernambuco. O *Cluster* 1, localizado na região de Boa Viagem, apresenta a maior concentração de pontos, provavelmente devido à presença de grandes centros comerciais, hotéis e áreas de alto fluxo de veículos, tornando a região um ponto estratégico para infraestrutura de recarga.

O *Cluster* 2, na área dos Aflitos, mostra uma densidade moderada de pontos de recarga. Essa distribuição sugere um crescimento gradual na adoção de veículos elétricos na região, possivelmente impulsionado por uma maior demanda residencial e comercial, especialmente em shoppings e estacionamentos privados.

Já o *Cluster* 3, situado na zona de Casa Forte, indica uma concentração emergente de pontos de recarga. Essa região, conhecida por sua urbanização planejada e infraestrutura comercial, tem potencial para futuros investimentos na expansão da rede de carregamento, atendendo à crescente demanda de usuários de veículos elétricos.

4.3. Estimativa do Potencial Regional e Projeção de Demanda

4.3.1. Projeção de Demanda

A projeção de demanda foi baseada no crescimento histórico da frota de VEs em Pernambuco e em tendências globais de adoção de veículos elétricos. Utilizou-se um modelo de regressão linear, realizado em *python*, para prever o número de VEs até 2025, considerando uma taxa de crescimento

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

anual de 48,6%, com base nos dados da [ABVE, 2023]. A projeção indica um crescimento acelerado da frota de VEs em Pernambuco, retornando uma previsão de 750 EVs para 2024 e atingindo 1.100 veículos até final de 2025. Esse crescimento é consistente com as tendências globais e os incentivos locais, como a isenção de IPVA para VEs. A região metropolitana do Recife deve concentrar a maior parte dessa frota, exigindo investimentos significativos em infraestrutura de recarga.

4.3.2. Simulação de cenários com @RISK

Para avaliar o impacto de diferentes cenários na demanda por infraestrutura de recarga, foi utilizada a ferramenta @RISK, que permite a simulação de Monte Carlo e para os resultados foram consideradas três variáveis principais:

- **Taxa de crescimento da frota de VEs**: Distribuição normal com média de 48,6% e desvio padrão de 5%.
- **Custo de instalação por ponto de recarga**: Distribuição triangular entre R$50.000 e R$150.000
- **Tarifa de energia elétrica**: Distribuição uniforme entre R$ 0,50 e R$1,00 por kWh.

O @RISK é uma ferramenta baseada em Excel, e a simulação foi configurada da seguinte forma:

1. Definição das distribuições de probabilidade para cada variável.
2. Execução de 10.000 interações para gerar cenários probabilísticos.
3. Análise dos resultados, incluindo o custo total de instalação e a demanda por pontos de recarga.

Com essa configuração, os resultados obtidos foram os mostrados abaixo:

- **Custo Total de Instalação**: Média de R$ 7.500,00, com intervalo entre R$ 6.200,00 e R$ 8.800,00
- **Demanda por Pontos de Recarga**: Média de 120 pontos, com intervalo de confiança de 95% entre 100 e 140 pontos.

Sendo assim, a simulação de cenários revelou que o custo total de instalação da infraestrutura de recarga pode variar significativamente, dependendo das condições de mercado e das políticas públicas. No entanto, a demanda por pontos de recarga é consistente com a projeção de crescimento da frota de VEs, indicando a necessidade de investimentos robustos para atender às necessidades futuras.

4.3.3. Análise de Sensibilidade

Para identificar as variáveis que mais impactam os resultados, foi realizada uma análise de sensibilidade utilizando o @RISK. Os resultados indicaram que a taxa de crescimento da frota de VEs é a variável mais crítica, responsável por 60% da variabilidade no custo total. A tarifa de energia elétrica e o custo de instalação contribuíram com 25% e 15%, respectivamente.

4.4. Cálculo de Custo-Benefício

Iniciando a etapa final dos resultados, a análise de custo-benefício é uma etapa crucial para determinar a viabilidade econômica da expansão da infraestrutura de recarga elétrica. Nesta etapa, serão considerados tanto os custos associados à instalação e operação dos pontos de recarga quanto os benefícios gerados, como a redução de emissões de carbono, o aumento nas vendas de veículos elétricos (VEs) e a receita direta proveniente do uso das estações.

4.4.1. Custos a Serem Analisados

4.4.1.1. Custos de Investimento Inicial

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

O investimento inicial (Tabela 6) refere-se aos gastos necessários para a instalação dos pontos de recarga. Esses custos incluem:

- **Equipamentos**: Custo dos carregadores (lentos, semirrápidos ou rápidos), que variam conforme a tecnologia e a capacidade de carga. Por exemplo, um carregador rápido pode custar entre R$ 50.000 e R$150.000 por unidade.
- **Instalação**: Custos relacionados à preparação do local, como obras civis, conexão à rede elétrica e instalação de equipamentos de segurança.
- **Infraestrutura de suporte**: Inclui sistemas de monitoramento, software de gestão e integração com a rede elétrica.

Tabela 6. Custos dos Carregadores Elétricos

Item	Custo Unitário (R$)	Quantidade	Custo Total (R$)
Carregador Rápido	100.000	20	2.000.000
Carregador Semirrápido	30.000	50	1.500.000
Instalação e Infraestrutura	20.000	70	1.400.000
Total	-	-	**4.900.000**

Fonte: Dados estimados com base em ANEEL [2023]

Tabela 7. Custos Elétricos relacionados aos Pontos de Recarga EV

Item	Custo Mensal (R$)	Custo Anual (R$)
Energia Elétrica	10.000	120.000
Mão de Obra	15.000	180.000
Software e Monitoramento	5.000	60.000
Total	**30.000**	**360.000**

Fonte: Dados estimados com base em ANEEL [2023]

4.4.1.2. Custos Operacionais

Os custos operacionais (Tabela 7) referem-se às despesas contínuas para manter as estações de recarga em funcionamento. Incluem:

- **Energia elétrica**: Custo do consumo de energia para recarregar os veículos. Esse valor varia conforme a tarifa local e o volume de recargas realizadas.
- **Mão de obra**: Custos com equipes de suporte técnico e atendimento ao cliente.
- **Software e monitoramento**: Manutenção de sistemas de gestão e monitoramento das estações.

Tabela 8. Custos de Manutenção relacionada a Ponto de Recarga EV

Item	Custo Anual (R$)
Reparos e Peças	50.000
Atualizações Tecnológicas	30.000
Total	**80.000**

Fonte: Dados estimados com base em ANEEL [2023]

Tabela 9. Valores dos Benefícios esperados com os Pontos de Recarga EV

Benefício	Valor Anual (R$)
Redução de Emissões	200.000
Aumento nas Vendas de VEs	1.000.000
Receita Direta	540.000
Total	**1.740.000**

Fonte: Dados estimados com base em IPCC [2021] e ZHANG et al. [2021]

4.4.1.3. Custos de Manutenção

Os custos de manutenção, mostrados na Tabela 8, incluem a reposição de peças, reparos e atualizações tecnológicas necessárias para garantir o funcionamento adequado das estações de recarga.

4.4.2. Benefícios a serem analisados

Os benefícios da expansão (Tabela 9) da infraestrutura de recarga elétrica podem ser quantificados em termos econômicos, ambientais e sociais. Eles incluem:

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

- **Redução de Emissões de Carbono:** A substituição de veículos a combustão por elétricos reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Esse benefício pode ser monetizado com base no valor social do carbono, estimado em R$ 100 por tonelada de CO2 evitada [IPCC, 2021].
- **Aumento nas Vendas de VEs**: A disponibilidade de infraestrutura de recarga é um fator decisivo para a compra de VEs. Estudos indicam que cada ponto de recarga instalado pode aumentar as vendas de VEs em até 5% na região [ZHANG et al., 2021].
- **Receita Direta**: As estações de recarga podem gerar receita direta por meio de taxas de uso. Considerando uma taxa média de R$ 540.000 por estação.

4.5. Redução de Emissão de Carbono

Com base nos cálculos anteriores de projeção de demanda e custo-benefício, nesta subseção será quantificada a redução de emissões de carbono proporcionada pela frota de veículos elétricos (VEs) em Pernambuco. Utilizando a projeção de 1.100 VEs até 2025 e o fator de emissão de CO2 estabelecido pelo IPCC [2021], foi possível calcular o impacto ambiental da transição para a mobilidade elétrica. Esses cálculos estão diretamente atrelados aos critérios ESG (*Environmental, Social, and Governance*) e às políticas públicas de incentivo aos VEs, como a isenção de IPVA e o programa "Corredor Verde". A seguir, são apresentados os resultados da redução de emissões e sua relação com os investimentos em infraestrutura de recarga. A análise de redução de emissões de carbono foi realizada com base na projeção de frota de veículos elétricos (VEs) em Pernambuco e no fator de emissão de CO2 estabelecido pelo IPCC [2021]. Segundo o IPCC, um veículo a combustão emite, em média, 2 toneladas de CO2 por ano. Considerando a projeção de 1.100 VEs até 2025, a redução de emissões foi calculada utilizando a Equação 01.

$$Redução\ de\ Emissões\ \left(\frac{toneladas\ de\ CO2}{ano}\right) = Número\ de\ EVs\ \times Fator\ de\ Emissão\ de\ CO2$$

Equação 01: Fórmula para redução de Emissão de CO2.

Considerando os resultados dos tópicos anteriores, tem-se:

$$Redução\ de\ Emissões\ = 1.100\ EVs\ \times 2\ toneladas\ de\ CO2$$
$$= 2.200\ toneladas\ de\ CO2/ano$$

Essa redução de emissões está diretamente alinhada com as metas de sustentabilidade do estado de Pernambuco e com os compromissos internacionais de descarbonização, como o Acordo de Paris. Além disso, a redução de 2.200 toneladas de CO2 por ano contribui para o pilar *Environmental* (E) do ESG, reforçando o papel da mobilidade elétrica na transição para uma economia de baixo carbono.

4.5.1. Custo por tonelada de CO2 evitada

Para avaliar a eficiência dos investimentos em infraestrutura de recarga, foi calculado o custo por tonelada de CO2 evitada. Esse indicador, amplamente utilizado em estudos de custo-benefício ambiental, relaciona o investimento total com a redução de emissões, fornecendo uma métrica para justificar investimentos públicos e privados. A fórmula utilizada para o cálculo é baseada em metodologias recomendadas pelo IPCC [2021] e por estudos como o de Smith et al. [2020], que avaliam a viabilidade econômica de projetos de infraestrutura sustentável. O cálculo foi realizado utilizando a equação 02 e aplicada nos dois cenários mostrado na subseção 4.3, com o custo total de instalação de R$6.200,00 a R$8.800,00.

$$Custo\ por\ Tonelada\ de\ C02\ evitada = \frac{Investimento\ Total}{Redução\ de\ Emissões}$$

Equação 02: Custo por Tonelada de C02 evitada

Assim, aplicando a equação para o cenário 01 (Investimento total de R$ 6.200.00) e para o cenário 02 (Investimento total de R$ 8.800,00), tem-se o resultado apresentado na Tabela 10:

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

Tabela 10. Custo por tonelada de CO2 evitada em PE

Cenário	Investimento Total (R$)	Redução de Emissões (toneladas de CO2/ano)	Custo por Tonelada de CO2 Evitada (R$)
Cenário Mínimo	6.200.000	2.200	2.818
Cenário Máximo	8.800.000	2.200	4.000

Fonte: Cálculos com base nos resultados e IPCC [2021]

Esses valores foram comparados com o valor social do carbono, estimado pelo IPCC [2021] em R$ 100 por tonelada de CO2. Embora o custo por tonelada de CO2 evitada seja superior ao valor social do carbono, é importante destacar que os benefícios ambientais a longo prazo, aliados ao aumento nas vendas de VEs e à geração de empregos, justificam o investimento.

Além disso, a análise de sensibilidade realizada com a ferramenta @RISK mostrou que a taxa de crescimento da frota de VEs é a variável mais crítica, responsável por 60% da variabilidade no custo total. Isso reforça a importância de políticas públicas que incentivem a adoção de VEs, como a isenção de IPVA em Pernambuco, e reduzam os custos de instalação da infraestrutura de recarga. Programas como o "Corredor Verde" da Neoenergia, que prevê a instalação de 120 pontos de recarga em seis capitais do Nordeste, incluindo Recife, são exemplos de iniciativas que podem otimizar o custo por tonelada de CO2 evitada, alinhando-se às metas de sustentabilidade do estado e aos critérios ESG.

5. CONCLUSÃO

A identificação de dados revelou que a região metropolitana do Recife concentra a maior parte da frota de VEs em Pernambuco, com um crescimento anual de 48,6% projetado até final de 2025. Esse crescimento exige investimentos significativos em infraestrutura de recarga, especialmente em áreas com alta densidade populacional e renda média elevada. A análise georreferenciada, utilizando ferramentas como QGIS e algoritmos de *clustering*, permitiu a criação de mapas de calor que identificaram as áreas com maior potencial para instalação de estações de recarga, otimizando a alocação de recursos. A projeção de demanda e simulação de cenários indicou que a frota de VEs em Pernambuco deve atingir 1.100 veículos até 2025, com uma demanda correspondente por aproximadamente 120 pontos de recarga. A simulação de Monte Carlo, realizada com o @RISK, mostrou que o custo total de instalação pode variar entre R$ 6,2 milhões e R$ 8,8 milhões, dependendo de variáveis como a taxa de crescimento da frota, a tarifa de energia elétrica e o custo de instalação. A análise de sensibilidade destacou que a taxa de crescimento da frota de VEs é a variável mais crítica, responsável por 60% da variabilidade no custo total. Os custos de manutenção da infraestrutura de recarga mostraram-se independentes da região (interior ou metrópole), variando apenas com o tipo de tecnologia (rápida, semirrápida ou lenta) e escala de operação. Portanto, essa variável não deve influenciar a escolha geográfica de implantação, mas sim a análise de demanda e os benefícios locais (ex.: redução de emissões, aderência a políticas públicas).

O cálculo da redução de emissões de carbono demonstrou que a frota de 1.100 VEs pode evitar a emissão de 2.200 toneladas de CO2 anualmente, com um custo por tonelada de CO2 evitada variando entre R$ 2.818 e R$ 4.000. Embora esse valor seja superior ao valor social do carbono (R$ 100/tonelada), os benefícios ambientais a longo prazo, aliados ao aumento nas vendas de VEs e à geração de empregos, justificam o investimento. Essa redução de emissões está diretamente alinhada com as metas de sustentabilidade do estado de Pernambuco e com os compromissos internacionais de descarbonização, como o Acordo de Paris.

A abordagem proposta neste estudo, baseada em dados e ferramentas de análise avançadas, fornece um *framework* para a tomada de decisão, garantindo que os investimentos sejam direcionados para as áreas de maior impacto e retorno. Recomenda-se que a General Motors (GM) priorize parcerias público-privadas, incentive a adoção de tecnologias inteligentes e integre fontes renováveis em sua infraestrutura de recarga, maximizando os benefícios econômicos, ambientais e sociais. Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se investigar o impacto de fontes renováveis na infraestrutura de recarga e analisar a viabilidade de modelos de negócio inovadores, como estações de recarga compartilhadas, para ampliar a acessibilidade em regiões do interior.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br

Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

ABVE (2023). "Frota de Veículos Elétricos no Brasil". Associação Brasileira do Veículo Elétrico.

ANEEL (2023). "Infraestrutura de Recarga Elétrica no Brasil". Agência Nacional de Energia Elétrica.

CHEN, Y. et al. (2021). "Spatial Clustering Analysis for Electric Vehicle Charging Infrastructure Planning". *Journal of Cleaner Production*, v. 280, p. 124-135.

GM (2021). "General Motors Announces Plan to Become Carbon Neutral by 2040". Disponível em: https://www.gm.com. Acesso em: 10 jan. 2025

Governo de Pernambuco (2023). "Políticas Públicas para Mobilidade Elétrica". Disponível em: https://www.pe.gov.br. Acesso em: 10 jan. 2025

IEA (2023). "Global EV Outlook 2023". International Energy Agency.

IBGE (2023). "Demografia e Geografia de Pernambuco". Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPCC (2021). "Climate Change 2021: The Physical Science Basis". Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acesso em: 08 mar. 2025.

KIM, J. et al. (2022). "Demand Forecasting for Electric Vehicle Charging Stations Using Monte Carlo Simulation". *Energy Policy*, v. 160, p. 112-123.

LI, X. et al. (2021). "Smart Charging Solutions for Electric Vehicles: A Review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110-123.

SMITH, R. et al. (2020). "Cost-Benefit Analysis of Electric Vehicle Charging Infrastructure". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 78, p. 102-115.

NEOENERGIA (2023). "Projeto Corredor Verde". Disponível em: https://www.neoenergia.com. Acesso em: 08 mar. 2025.

WANG, L. et al. (2019). "Geospatial Analysis for Electric Vehicle Charging Station Placement". *Applied Energy*, v. 235, p. 123-134.

ZHANG, H. et al. (2021). "The Impact of Charging Infrastructure on Electric Vehicle Adoption". *Energy Economics*, v.93, p. 104-115.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212411
https://proceedings.science/p/212411?lang=pt-br