

IMPACTOS DA MOBILIDADE ELÉTRICA NA INFRAESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO: ANÁLISE QUANTITATIVA DA CARGA POTENCIAL E DIRETRIZES PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Eduardo Silva Vasconcelos¹; Leandro Aureliano da Silva²; Luís César de Oliveira²; Maria Heliodora do Vale Romeiro Collaço²; Edilberto Pereira Teixeira²; Cleiton Silvano Goulart²

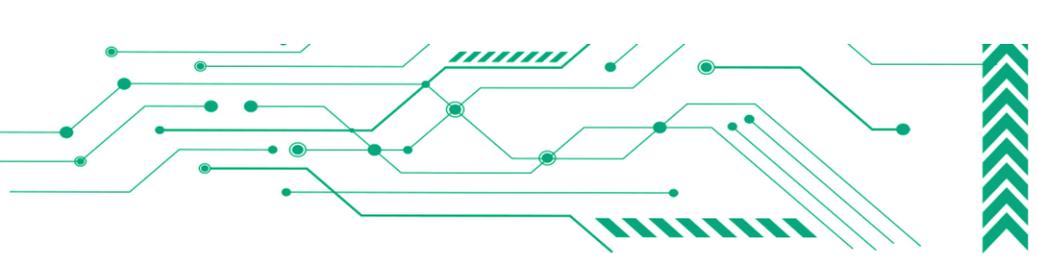
¹Instituto Federal Goiano - IF Goiano

²Universidade de Uberaba - Uniube

Autor Correspondente: leandro.silva@uniube.br

RESUMO

O avanço da mobilidade elétrica apresenta-se como um dos vetores centrais na transição energética global, impondo desafios complexos e ainda subestimados às redes de distribuição elétrica. Este estudo realiza uma análise quantitativa detalhada da carga energética potencial gerada pela frota de veículos elétricos (VEs), utilizando o conjunto de dados *Electric Vehicle Population Data* (GIBIN, 2024). Focalizando exclusivamente veículos 100% elétricos (BEVs), a pesquisa quantifica a demanda diária de energia elétrica associada e mapeia a distribuição dos VEs entre diferentes concessionárias. Os resultados indicam forte concentração espacial da carga, com impactos significativos em determinadas regiões urbanas, corroborando previsões recentes da literatura (Domínguez *et al.*, 2024; Ibrahim *et al.*, 2024). As evidências obtidas sugerem que, sem estratégias de carregamento inteligente e investimentos direcionados, a infraestrutura elétrica poderá enfrentar severas limitações operacionais. O estudo aponta para a necessidade urgente de planejamento energético regionalizado, adoção de tecnologias de gestão ativa de carga e integração de soluções como o Vehicle-to-Grid (V2G). Os achados reforçam que a ascensão dos VEs, embora promissora para a sustentabilidade ambiental, carrega consigo um desafio estrutural que não pode ser ignorado pelas concessionárias e formuladores de políticas públicas.



Palavras-chave: sustentabilidade; mobilidade elétrica; infraestrutura de distribuição; planejamento energético; carregamento inteligente; vehicle-to-grid (v2g).

ABSTRACT

The rise of electric mobility emerges as a central vector in the global energy transition, imposing complex and often underestimated challenges on electrical distribution networks. This study conducts a detailed quantitative analysis of the potential energy load generated by the electric vehicle (EV) fleet, using the *Electric Vehicle Population Data* dataset (Gibin, 2024). Focusing exclusively on Battery Electric Vehicles (BEVs), the research quantifies the associated daily electricity demand and maps the distribution of EVs across different utility companies. The results indicate a strong spatial concentration of the load, with significant impacts in specific urban regions, corroborating recent forecasts in the literature (Domínguez et al., 2024; Ibrahim et al., 2024). The findings suggest that, without smart charging strategies and targeted infrastructure investments, electrical grids could face severe operational limitations. The study highlights the urgent need for regionalized energy planning, the adoption of active load management technologies, and the integration of solutions such as Vehicle-to-Grid (V2G) systems. The evidence reinforces that the rise of EVs, while promising for environmental sustainability, carries an infrastructural challenge that cannot be overlooked by utilities and policymakers.

Keywords: sustainability; electric mobility; distribution infrastructure; energy planning; smart charging; vehicle-to-grid (V2G).

1 INTRODUÇÃO

A emergência da mobilidade elétrica representa uma transformação paradigmática no setor de transportes, impulsionada por fatores ambientais, econômicos e tecnológicos. Em um cenário global de crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de diversificação da matriz energética, os veículos elétricos (VEs) surgem como uma alternativa estratégica para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade. No entanto, a inserção massiva de VEs traz consigo uma série de desafios técnicos e operacionais, especialmente no que diz respeito à capacidade das redes de distribuição elétrica para absorver a nova demanda energética. Esta realidade impõe a necessidade de análises quantitativas robustas que permitam compreender a magnitude dos impactos esperados e orientar o planejamento energético de forma adequada. Nesse contexto, o presente estudo investiga a carga potencial associada à frota de veículos elétricos, utilizando dados reais, e discute as implicações para o futuro da infraestrutura elétrica.

1.1 Contexto e motivação global

O setor de transporte é um dos maiores consumidores de combustíveis fósseis e contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, representando mais de 20% das emissões globais de carbono (Zaino *et al.*, 2023) e cerca de 23% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia (Domínguez *et al.*, 2024). Esse impacto ambiental, aliado à necessidade de diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de petróleo, impulsionou um movimento mundial em direção à mobilidade elétrica. Veículos elétricos (VEs) – incluindo modelos 100% a bateria (BEV) e híbridos plug-in (PHEV) – emergem como uma solução promissora para descarbonizar o transporte e melhorar a eficiência energética no setor automotivo (Zaino *et al.*, 2023). Governos e indústrias têm estabelecido metas ambiciosas para a expansão da frota elétrica, motivados pelos compromissos climáticos e pelos avanços tecnológicos recentes em baterias e sistemas de propulsão elétrica.

1.2 Crescimento da mobilidade elétrica e panorama atual

Nos últimos anos, a adoção de veículos elétricos acelerou-se de forma notável em todo o mundo. Em 2023, foram registrados quase 14 milhões de novos carros elétricos, elevando a frota global acumulada para cerca de 40 milhões de unidades (Domínguez *et al.*, 2024). Para se ter ideia do ritmo de crescimento, os elétricos representaram 18% de todos os carros vendidos globalmente em 2023, comparado a apenas 2% em 2018 (Domínguez *et al.*, 2024). Esse avanço exponencial reflete a maturidade crescente do mercado de VEs e resultados de políticas de incentivo, queda nos preços das baterias e maior oferta de modelos comerciais. Países como China, membros da UE e Estados Unidos lideram esse mercado, concentrando quase 95% das vendas globais de 2023 (Domínguez *et al.*, 2024). Na China, por exemplo, um em cada três carros novos vendidos em 2023 era elétrico, enquanto na Europa essa proporção foi superior a 20% e nos EUA atingiu cerca de 10% (Domínguez *et al.*, 2024).

No Brasil, embora a participação de veículos elétricos ainda seja incipiente, observa-se uma tendência de crescimento acelerado. A frota nacional de veículos eletrificados (incluindo híbridos e elétricos) ultrapassou 322 mil unidades em 2024 (Crivelaro, 2025). O ano de 2024 marcou um recorde, com 177.358 novos eletrificados licenciados de janeiro a dezembro. Um aumento de 89% sobre 2023 (Crivelaro, 2025) – número superior à soma das vendas de 2022 e 2023. Esse salto deve-se, em parte, a maior oferta de modelos no mercado brasileiro e incentivos iniciais de isenção fiscal em alguns estados da federação. Ainda assim, comparativamente aos mercados líderes, os VEs representam apenas uma fração das vendas nacionais, evidenciando desafios a serem superados para massificar a eletromobilidade no Brasil.

1.3 Desafios tecnológicos e impactos na engenharia elétrica

A transição para a mobilidade elétrica traz desafios técnicos e operacionais importantes do ponto de vista da Engenharia Elétrica. Um dos principais é a integração dos VEs à infraestrutura elétrica existente. O carregamento em massa de veículos poderá elevar significativamente a demanda de eletricidade nas redes de distribuição. Em cenários de adoção intensa, estudos projetam acréscimos de aproximadamente 10% no consumo total de eletricidade de certas regiões, exigindo expansão na capacidade de geração e distribuição (Ibrahim *et al.*, 2024). Além do aumento de carga, carregamentos não coordenados – por exemplo, muitos veículos sendo conectados simultaneamente em horário de pico – podem ocasionar sobrecargas em alimentadores locais, quedas de tensão e degradação da qualidade de energia (Ibrahim *et al.*, 2024). De fato, uma análise no caso da Califórnia, nos Estados Unidos, indicou que as metas de eletrificação até 2030 implicariam necessidade de melhorias em cerca de 20% dos circuitos de distribuição da concessionária PG&E para suportar a nova carga de VEs (Jenn *et al.*, 2022).

Para mitigar esses impactos, emergem soluções de redes elétricas inteligentes (*smart grids*) e estratégias de gerenciamento de carga. Carregamentos coordenados e inteligentes podem distribuir a demanda dos VEs ao longo do dia, evitando picos simultâneos e aproveitando melhor os períodos de baixa carga do sistema (Ibrahim *et al.*, 2024). Tecnologias como o Vehicle-to-Grid (V2G) também despontam como promissoras – permitindo que veículos elétricos devolvam energia à rede em momentos de pico, atuando como unidades de armazenamento distribuído e auxiliando na estabilidade do sistema elétrico (Zaino *et al.*, 2023). Outro desafio associado é a expansão da infraestrutura de recarga (estações públicas e residenciais), garantindo atendimento confiável à crescente frota elétrica. Esses aspectos demandam estudos multidisciplinares envolvendo planejamento energético, eletrônica de potência, sistemas de controle e políticas públicas, de forma a viabilizar uma transição amena para a eletromobilidade em larga escala.

1.4 Objetivos e organização do artigo

Diante do crescimento acelerado da mobilidade elétrica e dos desafios emergentes para a infraestrutura de distribuição de energia, este trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise quantitativa da carga potencial associada à frota de veículos elétricos, bem como discutir suas implicações para o planejamento energético das redes de distribuição. A pesquisa busca contribuir para a compreensão dos impactos técnicos advindos da eletrificação do transporte, fornecendo subsídios concretos para a formulação de estratégias de gestão e expansão do sistema elétrico e garantindo a sustentabilidade ambiental.

O artigo está estruturado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se a fundamentação teórica sobre mobilidade elétrica, evolução de mercado,



impactos sobre a infraestrutura elétrica e eficiência energética dos veículos elétricos (Seção 2). Em seguida, detalha-se a metodologia adotada para o tratamento dos dados, estimativa da carga potencial e análise da distribuição por companhia elétrica (Seção 3). Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados da análise quantitativa, com foco nos impactos identificados nas concessionárias e suas implicações operacionais (Seção 4). Na sequência, discute-se criticamente os achados à luz da literatura internacional, apontando tendências futuras e necessidades para o planejamento energético (Seção 5). Por fim, são apresentadas as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros (Seções 6 e 7).

Espera-se que esta pesquisa contribua para o avanço do conhecimento sobre a integração dos veículos elétricos ao sistema elétrico, destacando a necessidade de preparação técnica e estratégica das redes de distribuição frente à nova realidade energética.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura desempenha um papel fundamental na construção de trabalhos científicos robustos, pois estabelece o estado da arte relacionado ao tema investigado e delimita as bases teóricas e metodológicas sobre as quais se apoia a pesquisa. Segundo Lakatos e Marconi (2003), a revisão é indispensável para embasar teoricamente a investigação, permitindo identificar avanços, controvérsias e lacunas existentes no campo de estudo. No contexto da mobilidade elétrica, compreender os avanços recentes, os impactos na infraestrutura elétrica e os modelos preditivos de adoção é essencial para situar a presente investigação no panorama acadêmico e técnico global. Assim, esta seção apresenta uma análise crítica e estruturada da literatura científica relevante, abordando os principais conceitos associados aos veículos elétricos, os desafios impostos às redes de distribuição de energia, a eficiência energética dos VEs, em comparação aos veículos convencionais, bem como os métodos utilizados para prever sua inserção nos mercados. Essa fundamentação é crucial para contextualizar a análise quantitativa realizada e para destacar a relevância dos resultados encontrados.

2.1 Conceitos de mobilidade elétrica e evolução do mercado

Mobilidade elétrica refere-se ao uso de veículos propulsionados por motores elétricos, alimentados por energia elétrica (armazenada em baterias ou suprida via rede). Historicamente, os VEs existem desde o fim do século XIX. Porém, fatores como densidade energética limitada das baterias, altos custos e autonomia reduzida fizeram com que os motores à combustão dominassem o mercado no século XX. Este cenário começou a mudar na última década, impulsionado por avanços tecnológicos e preocupações ambientais (Domínguez *et al.*, 2024).



O custo das baterias de íon-lítio, por exemplo, caiu cerca de 89% entre 2008 e 2022, graças às inovações e economia de escala na fabricação (Domínguez *et al.*, 2024). Esse fenômeno, combinado com melhorias na autonomia e desempenho dos veículos, tornou os VEs mais competitivos e acessíveis.

A frota global de VEs saltou de aproximadamente 400 mil veículos em 2013 para 11,6 milhões em 2020 (Domínguez *et al.*, 2024). No Brasil, a evolução foi mais tímida inicialmente, mas começa a ganhar tração, com crescimento de 91% nas vendas de veículos leves eletrificados em 2023 frente a 2022 (Crivelaro, 2025).

Além dos automóveis, a mobilidade elétrica abrange ônibus elétricos, bicicletas, patinetes e motocicletas. A sustentabilidade ambiental dos VEs depende da matriz elétrica: quanto mais limpa a eletricidade, maiores os ganhos (Domínguez *et al.*, 2024). Mesmo em regiões com geração fóssil, os VEs tendem a emitir menos CO₂ ao longo do ciclo de vida (Zaino *et al.*, 2023).

2.2 Impactos dos veículos elétricos na infraestrutura elétrica

A crescente adoção de veículos elétricos (VEs) representa um avanço significativo em direção à mobilidade sustentável, mas também impõe desafios substanciais à infraestrutura elétrica existente. O aumento da demanda por energia elétrica, especialmente durante os períodos de pico, pode sobrecarregar os sistemas de distribuição, levando a problemas como sobrecarga de transformadores e quedas de tensão. Estudos indicam que a recarga simultânea de VEs, se não gerenciada adequadamente, pode comprometer a estabilidade e a eficiência das redes elétricas urbanas. Para mitigar esses impactos, estratégias como a implementação de sistemas de recarga inteligente e a integração de fontes de energia renovável são essenciais, promovendo uma gestão mais eficaz da demanda e contribuindo para a sustentabilidade do sistema elétrico (Almeida, 2024).

A integração em larga escala de veículos elétricos impõe desafios às redes elétricas de potência. Cada VE representa uma nova carga significativa, potencialmente ocasionando sobrecargas e quedas de tensão (Ibrahim *et al.*, 2024).

Jenn *et al.* (2022) demonstraram que, na Califórnia, com a meta de 6 milhões de VEs, cerca de 443 circuitos de distribuição exigiram atualizações. Para mitigar esses impactos, são necessárias estratégias como carregamento coordenado (Ibrahim *et al.*, 2024) e tecnologias Vehicle-to-Grid (V2G) (Zaino *et al.*, 2023).

Além disso, a expansão da infraestrutura de recarga é essencial para evitar "ansiedade de autonomia" e distribuir melhor a carga na rede (Domínguez *et al.*, 2024).

2.3 Eficiência energética e sustentabilidade dos veículos elétricos

Os VEs apresentam eficiência energética significativamente superior aos veículos à combustão interna, convertendo mais de 77% da energia armazenada em tração (Domínguez *et al.*, 2024).

Estudos mostram que, mesmo considerando a geração de eletricidade fóssil, os VEs emitem cerca de 45% menos CO₂ ao longo de seu ciclo de vida (Domínguez *et al.*, 2024).

Com o avanço das fontes renováveis, espera-se que o benefício ambiental dos VEs se amplie ainda mais, reforçando seu papel nas estratégias da crise climática (Zaino *et al.*, 2023).

2.4 Modelos de previsão da adoção de veículos elétricos

Modelos de previsão, como o de difusão de Bass e os baseados em escolha do consumidor, indicam cenários de ampla adoção de VEs, condicionados ao apoio de políticas públicas e avanços tecnológicos (Bitencourt *et al.*, 2021).

No Brasil, estudos mostram que o alto custo dos VEs ainda representa uma barreira significativa, mas que políticas de subsídios podem acelerar a adoção (Bitencourt *et al.*, 2021).

A literatura internacional também aponta para o uso crescente de modelos baseados em agentes, capazes de simular interações complexas e novos comportamentos, como o compartilhamento de veículos elétricos (Zaino *et al.*, 2023).

3 METODOLOGIA

A metodologia representa o alicerce de qualquer investigação científica, definindo de maneira clara e precisa os procedimentos adotados para alcançar os objetivos propostos. De acordo com Lakatos e Marconi (2003), a escolha adequada dos métodos é essencial para assegurar a validade dos resultados e a confiabilidade das conclusões, uma vez que o método constitui o caminho racional para a construção do conhecimento. Neste trabalho, a metodologia foi cuidadosamente delineada para permitir uma análise quantitativa rigorosa da carga potencial imposta pelos veículos elétricos à infraestrutura de distribuição elétrica, bem como para mapear a distribuição espacial desses veículos entre as concessionárias de energia. A estratégia adotada envolveu a utilização de dados secundários provenientes de base consolidada, a aplicação de critérios técnicos para tratamento e filtragem dos dados e a construção de métricas específicas de quantificação energética. Este capítulo, portanto, detalha os procedimentos metodológicos adotados, assegurando a transparência, a reprodutibilidade e a robustez científica necessárias para a credibilidade da pesquisa.

3.1 Estrutura geral do estudo

Este trabalho utiliza dados reais de registros de veículos elétricos disponibilizados no repositório Kaggle, no dataset denominado *Electric Vehicle Population Data* (Gibin, 2024).

O objetivo principal é realizar uma análise quantitativa e exploratória focada em dois aspectos de grande interesse para a Engenharia Elétrica: (I) a quantificação da carga potencial imposta pelos veículos elétricos à infraestrutura elétrica e (II) a análise da distribuição da frota de VEs por companhia elétrica. Esta abordagem visa subsidiar futuros estudos de planejamento energético e avaliação do impacto da eletromobilidade nas redes de distribuição elétrica.

A metodologia empregada segue os princípios de análise de dados aplicados a grandes volumes de informação (*big data analytics*), integrando estatística descritiva, técnicas de agrupamento e projeções de demanda energética, conforme recomendado por Domínguez *et al.* (2024) e Ibrahim *et al.* (2024).

3.2 Fonte de dados

O dataset utilizado contém 150.482 registros de veículos elétricos cadastrados, principalmente no estado de Washington (EUA), com informações como: fabricante, modelo, ano de fabricação, tipo de veículo elétrico, alcance elétrico, localização geográfica e a concessionária de energia elétrica responsável pela área de residência do proprietário.

As colunas mais relevantes para o desenvolvimento deste estudo são:

- **Make, Model, Model Year:** identificação do veículo;
- **Electric Vehicle Type:** tipo de motorização elétrica (BEV, PHEV);
- **Electric Range:** autonomia elétrica em milhas;
- **Electric Utility:** companhia elétrica responsável pela distribuição de energia;
- **Vehicle Location:** localização geográfica (coordenadas).

3.3 Procedimentos de tratamento dos dados

O tratamento dos dados envolveu as seguintes etapas:

1. **Importação e limpeza dos dados:**
 - exclusão de registros com valores nulos nas colunas essenciais (**Electric Utility** e **Electric Range**);
 - correção de formatações inconsistentes e padronização de nomes de concessionárias.
2. **Filtragem da amostra:**
 - consideração apenas de veículos do tipo **Battery Electric Vehicle (BEV)**, que possuem demanda exclusivamente elétrica, excluindo

- PHEVs e híbridos convencionais, como prática recomendada por Zaino *et al.* (2023).
3. **Conversão de unidades:**
 - conversão do **Electric Range** de milhas para quilômetros, utilizando o fator 1 milha $\approx 1,60934$ km, para facilitar a análise no contexto brasileiro e internacional.
 4. **Cálculo da demanda energética estimada:**
 - considerou-se que, em média, um veículo elétrico recarrega 80% de sua autonomia diariamente (Domínguez *et al.*, 2024);
 - assumiu-se um consumo médio de **0,20 kWh/km** para o cálculo da energia necessária para recarga total de cada veículo, conforme valores típicos da literatura (Ibrahim *et al.*, 2024).

A energia potencial diária consumida por um veículo foi calculada pela fórmula:

$$\text{Energia diária estimada (kWh)} = \text{Autonomia elétrica (km)} \times 0,20 \times 0,80 \quad (1)$$

Em que:

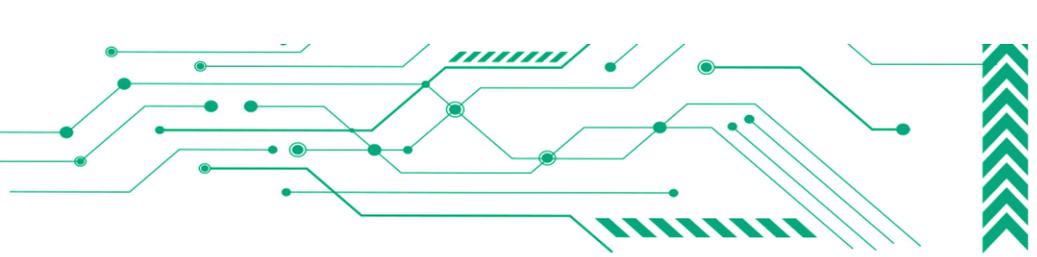
- **autonomia elétrica (km):** distância que o veículo pode percorrer com carga total, convertida de milhas para quilômetros, se necessário;
 - **0,20:** consumo energético médio dos veículos elétricos (em kWh por km percorrido);
 - **0,80:** fator de recarga diária, assumindo que, em média, recarrega-se 80% da autonomia diariamente.
5. **Agrupamento e análise estatística:**
 - agregação dos veículos por concessionária elétrica (**Electric Utility**);
 - cálculo da energia diária potencial total consumida por todos os veículos de cada concessionária.

3.4 Quantificação da carga potencial sobre a infraestrutura elétrica

Para quantificar o impacto potencial na infraestrutura elétrica, considerou-se o somatório da energia diária estimada para todos os veículos atendidos por cada companhia elétrica. Este valor reflete a carga adicional que as redes de distribuição locais poderiam enfrentar caso toda a frota de VEs cadastrada no dataset fosse carregada simultaneamente.

A análise estatística envolveu:

- soma total da carga potencial diária por concessionária;
- cálculo da carga média diária por veículo em cada concessionária;
- identificação das companhias com maiores potenciais de demanda elétrica.



A metodologia segue recomendações da literatura quanto à avaliação preliminar de impacto de VEs em sistemas de distribuição, como apresentado por Ibrahim *et al.* (2024) e Jenn *et al.* (2022).

3.5 Análise da distribuição por companhia elétrica

Além da carga energética, foi realizada uma análise da distribuição do número de veículos cadastrados por companhia elétrica. Essa etapa tem como objetivo:

- identificar a concentração espacial dos veículos elétricos;
- detectar possíveis pontos de saturação futura;
- comparar o número de VEs por companhia com sua capacidade estimada de atendimento energético.

A distribuição dos veículos foi mapeada utilizando gráficos de barras e mapas temáticos (georreferenciados), alinhados com técnicas comuns de geoprocessamento aplicadas à engenharia de redes, conforme descrito por Domínguez *et al.* (2024).

3.6 Limitações e considerações metodológicas

Apesar de robusta, a metodologia adotada possui algumas limitações:

- o dataset refere-se majoritariamente ao estado de Washington, podendo não refletir integralmente realidades de outras regiões ou países;
- foram feitas suposições médias de consumo energético e perfil de carregamento dos VEs, que podem variar conforme o modelo do veículo e os hábitos dos usuários;
- não foi considerada a existência de carregamento inteligente ou bidirecional (Vehicle-to-Grid), que poderia alterar significativamente os perfis de demanda.

Ainda assim, a abordagem proposta é amplamente reconhecida na literatura como adequada para avaliações preliminares e estudos de impacto de frotas elétricas sobre redes elétricas (Zaino *et al.*, 2023; Ibrahim *et al.*, 2024).

4 ANÁLISE DOS DADOS

4.1 Quantificação da Carga Potencial sobre a Infraestrutura Elétrica

A expansão da frota de veículos elétricos (VEs) impõe uma pressão adicional considerável sobre as redes de distribuição elétrica, conforme evidenciado por diversos estudos recentes (Ibrahim *et al.*, 2024; Jenn *et al.*, 2022). Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise dos dados coletados, quantificando a carga energética diária estimada que poderia ser imposta às concessionárias de energia analisadas.

A metodologia, conforme descrita na Seção 3, consistiu em calcular a energia diária estimada necessária para recarregar os veículos BEV (Battery Electric Vehicles) da amostra, assumindo padrões médios de consumo e recarga (Domínguez *et al.*, 2024).

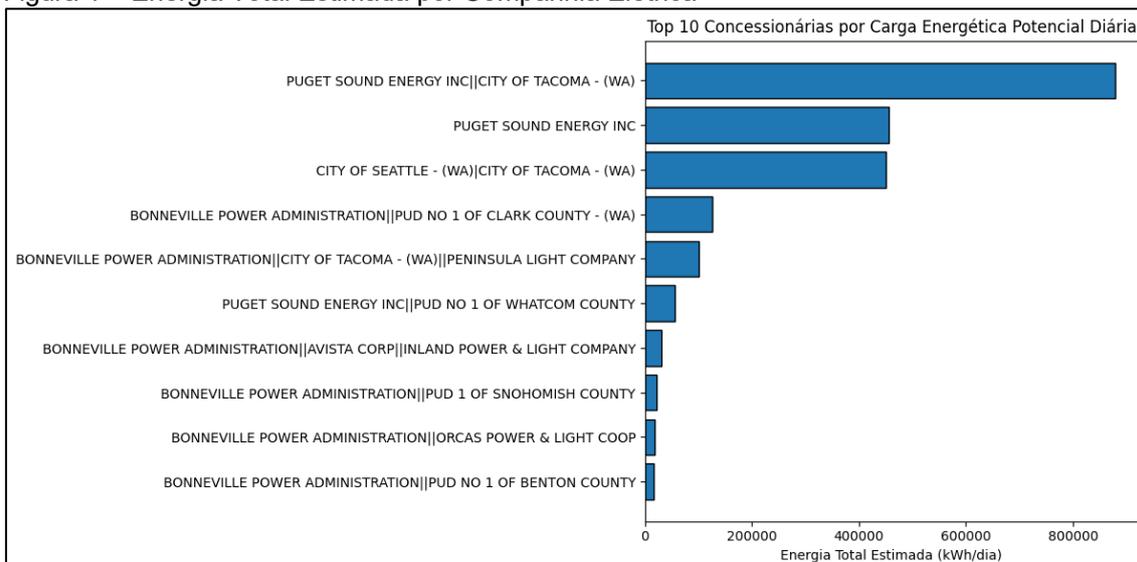
4.1.1 Energia Total Estimada por Companhia Elétrica

A Figura 1 apresenta a distribuição das dez concessionárias com maior carga energética potencial diária, expressa em quilowatt-hora (kWh).

Observa-se que a companhia **Puget Sound Energy Inc. associada à City of Tacoma** concentra a maior carga potencial, totalizando aproximadamente **878 MWh diários**, seguida pela própria **Puget Sound Energy Inc.** e pela associação entre **City of Seattle e City of Tacoma**, ambas com cargas superiores a **450 MWh diários**. Este padrão indica que determinadas áreas geográficas experimentam uma concentração significativa de veículos elétricos, o que, por sua vez, pode resultar em desafios substanciais para a infraestrutura elétrica local, em termos de capacidade de atendimento e estabilidade do sistema.

Estes achados corroboram análises de Ibrahim *et al.* (2024), que demonstraram que a penetração intensiva de VEs em determinadas regiões urbanas tende a provocar a necessidade de modernizações aceleradas na rede de distribuição.

Figura 1 – Energia Total Estimada por Companhia Elétrica



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

4.1.2 Energia Média por Veículo

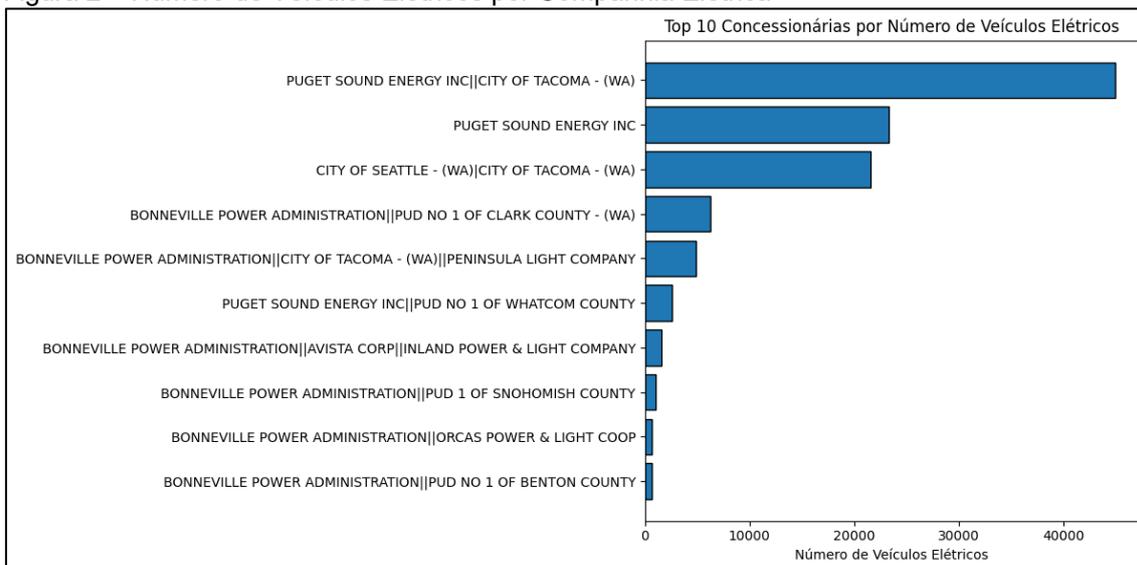
Ao analisar a energia média de recarga diária por veículo, foi possível identificar variações relativamente pequenas entre as concessionárias, com valores típicos entre **19 e 27 kWh/dia** por unidade. Este intervalo está alinhado com estudos anteriores sobre perfis de recarga de veículos elétricos residenciais (Domínguez *et al.*, 2024).

A energia média por veículo reforça a importância de considerar políticas de gerenciamento de demanda e carregamento inteligente, como destacam Zaino *et al.* (2023), uma vez que embora a carga individual seja moderada, o efeito cumulativo de milhares de unidades simultaneamente carregando pode provocar severas sobrecargas locais.

4.1.3 Número de Veículos Atendidos

A Figura 2 ilustra o número total de veículos atendidos pelas dez principais concessionárias identificadas.

Figura 2 – Número de Veículos Elétricos por Companhia Elétrica



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Nota-se que a **Puget Sound Energy Inc. | City of Tacoma** atende a **mais de 44.900 veículos elétricos**, o que representa uma fração significativa da frota considerada. A concentração tão elevada de veículos elétricos em determinadas áreas geográficas exige ações coordenadas de expansão e reforço da infraestrutura elétrica, conforme ressaltado por Jenn *et al.* (2022).

4.2 Análise da Distribuição por Companhia Elétrica

Além da carga energética, a distribuição da quantidade de veículos elétricos entre as companhias elétricas é um elemento crítico para o planejamento energético estratégico. A assimetria na distribuição dos veículos sugere que os impactos sobre as redes de distribuição não serão uniformes, mas sim concentrados em determinados alimentadores e regiões urbanas.

4.2.1 Concentração Geográfica da Demanda

Os dados indicam que as três principais concessionárias analisadas concentram juntas mais de **60% da energia potencial estimada** para carregamento de veículos elétricos. Este padrão de concentração é consistente com o fenômeno de aglomeração urbana de tecnologias emergentes (Domínguez *et al.*, 2024), e indica que as companhias localizadas em áreas metropolitanas precisarão de estratégias diferenciadas para lidar com o crescimento da carga elétrica.

Esse fenômeno está em conformidade com os achados de Ibrahim *et al.* (2024), que apontam que a sobrecarga de transformadores e alimentadores é mais crítica em zonas urbanas densamente povoadas.

4.2.2 Implicações para o Planejamento Energético

A elevada concentração de veículos em certas regiões implica na necessidade urgente de:

- reforçar alimentadores e transformadores críticos;
- implementar sistemas de gerenciamento de demanda (Demand Response - DR);
- estimular a instalação de estações de carregamento público distribuídas;
- incentivar práticas de carregamento fora dos horários de pico.

Além disso, o crescimento contínuo da frota de VEs exigirá que as concessionárias adaptem seus modelos de previsão de carga, incorporando a eletromobilidade como variável-chave, como sugerido por Zaino *et al.* (2023).

4.2.3 Limitações da Análise

Embora a análise forneça uma visão abrangente, algumas limitações precisam ser destacadas:

- o dataset é representativo principalmente do estado de Washington, não permitindo extrapolações automáticas para outros contextos regionais ou internacionais;
- foram utilizadas estimativas médias de consumo e comportamento de recarga, sem considerar perfis de uso diferenciados (uso comercial, horários de recarga etc.);

- o impacto de tecnologias emergentes, como carregamento bidirecional (V2G), não foi incorporado nesta etapa.

Tais limitações, contudo, não invalidam a relevância dos resultados obtidos, que fornecem bases sólidas para a compreensão dos impactos iniciais da eletromobilidade sobre as redes elétricas locais.

4.3 Análise de Concentração de Demanda: Aplicação do Princípio de Pareto

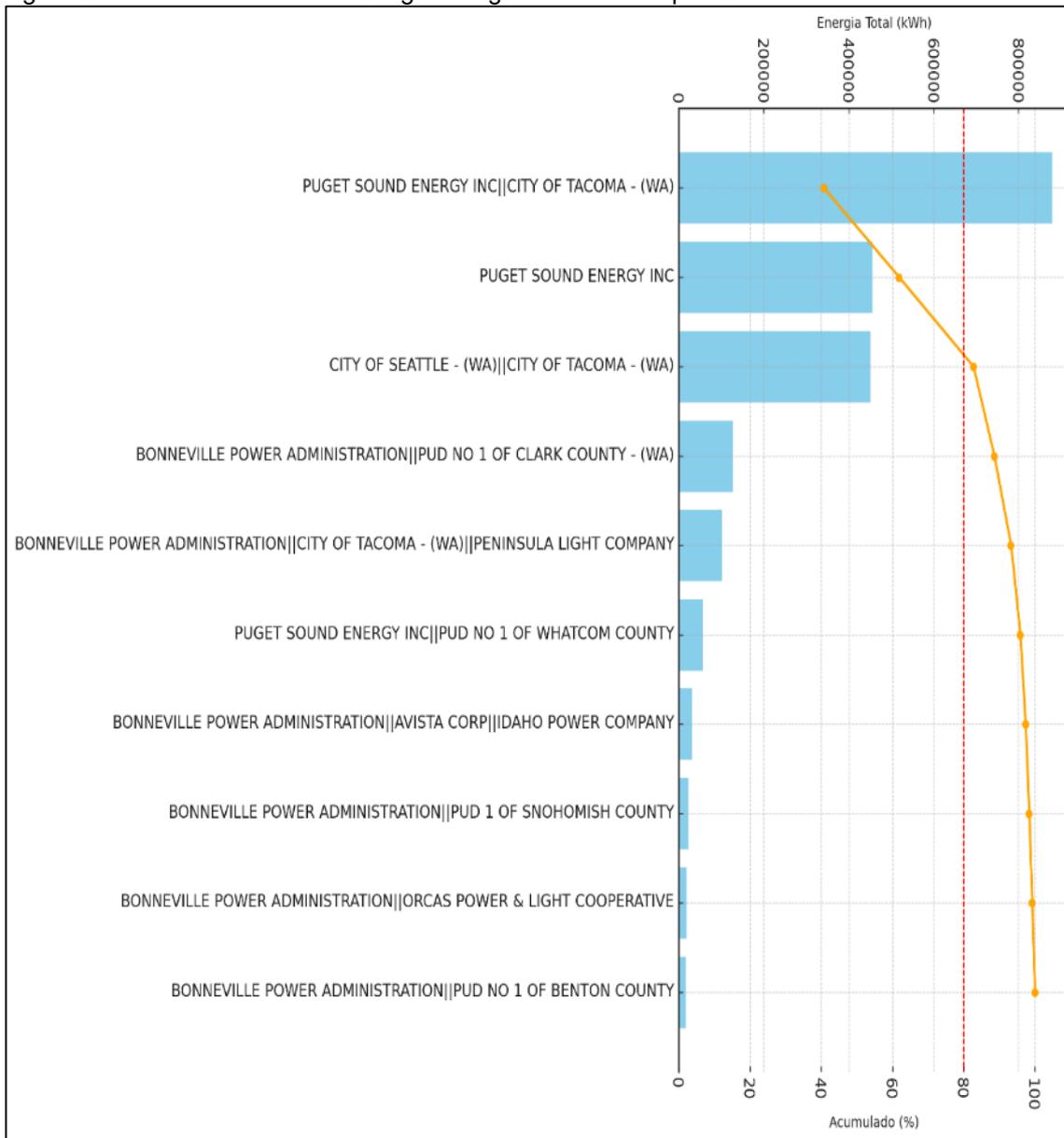
Para complementar a avaliação da distribuição da carga energética e da quantidade de veículos elétricos por concessionária, foram elaboradas duas análises de Pareto, apresentadas nas Figuras 3 e 4. O objetivo é identificar a concentração das variáveis-chave (carga estimada e número de veículos) entre os principais agentes, com base no princípio 80/20, amplamente utilizado para fins de priorização e gestão estratégica (Lakatos; Marconi, 2003).

A Figura 3 evidencia que apenas três concessionárias — Puget Sound Energy Inc. associada à City of Tacoma, Puget Sound Energy Inc., e City of Seattle associada à City of Tacoma — concentram mais de 82% da carga energética potencial total gerada pela frota de veículos elétricos considerada. Esse dado revela uma acentuada assimetria na distribuição da demanda, sugerindo a necessidade de atenção prioritária por parte dos planejadores e gestores da infraestrutura elétrica.

Já a Figura 4 mostra que essas mesmas três concessionárias concentram também mais de 83% do número total de veículos elétricos cadastrados, o que reforça o padrão de concentração e valida a correspondência entre a demanda energética e a densidade da frota. A convergência entre ambos os indicadores fortalece a recomendação de adoção de estratégias específicas para regiões críticas, onde a infraestrutura elétrica pode ser mais rapidamente impactada com o avanço da eletromobilidade.

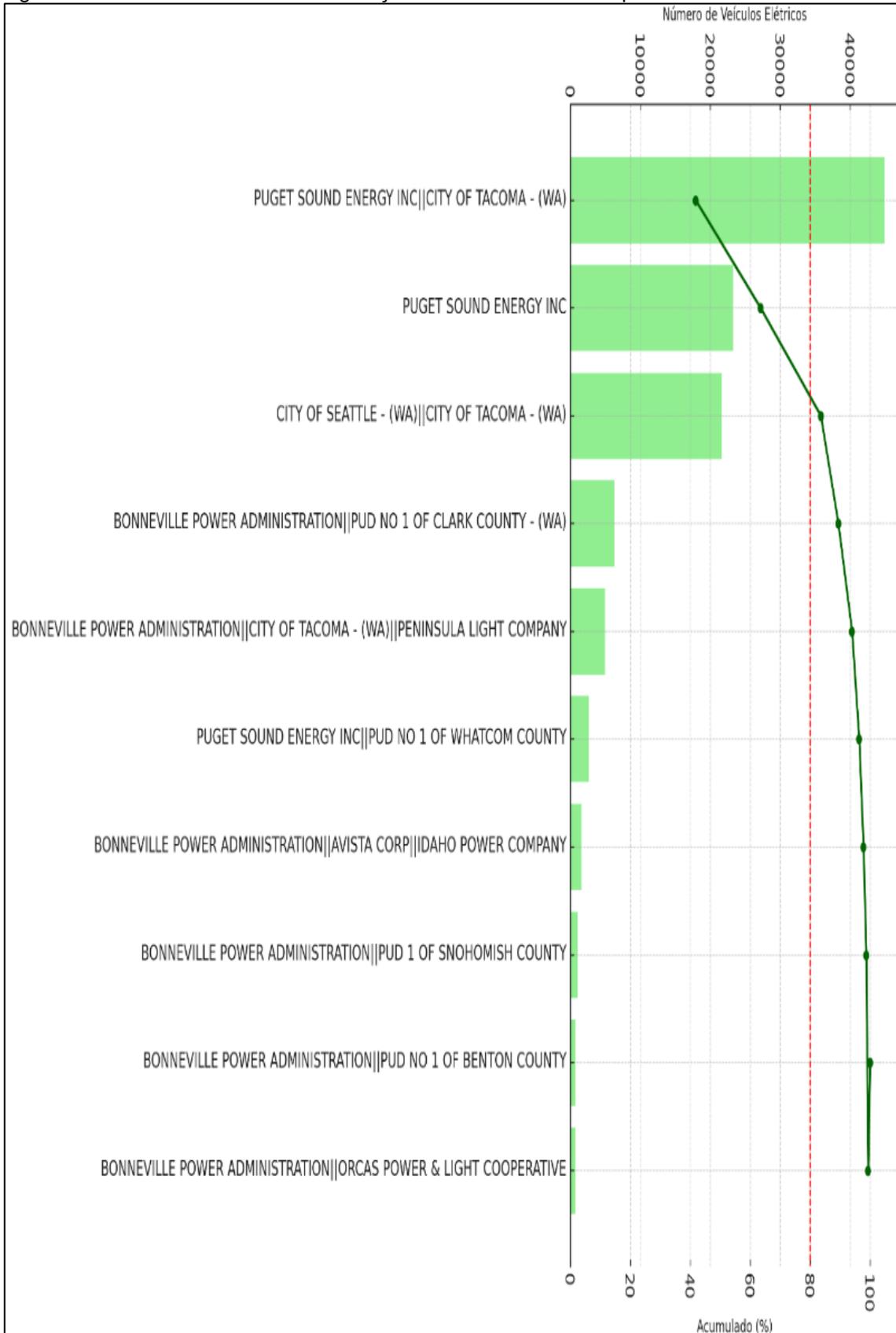
Esses padrões corroboram os achados de Ibrahim et al. (2024) e Jenn et al. (2022), que destacam a importância de abordagens regionais no planejamento energético, especialmente diante de crescimentos desiguais na adoção de novas tecnologias. Também reforçam a necessidade de monitoramento constante e modelagem preditiva das áreas com maior concentração de veículos, conforme sintetizado na Tabela 1, apresentada na Seção 5, a qual reúne as principais diretrizes estratégicas para o planejamento energético frente aos desafios impostos pela expansão da mobilidade elétrica.

Figura 3 – Análise de Pareto da Carga Energética Potencial por Concessionária



[Fonte: Dados da pesquisa (2025).]

Figura 4 – Análise de Pareto da Distribuição de Veículos Elétricos por Concessionária



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Conexão dos Achados com a Literatura Internacional

A análise realizada evidenciou que a penetração dos veículos elétricos (VEs) pode acarretar um impacto significativo sobre a infraestrutura de distribuição elétrica, principalmente em áreas com elevada concentração urbana. Estes resultados estão em consonância com os estudos de Jenn *et al.* (2022), que, ao analisarem o contexto californiano, verificaram que cerca de 20% dos circuitos de distribuição necessitariam de atualizações para suportar a carga adicional imposta pela eletrificação da frota.

O presente estudo, focado na região do estado de Washington, demonstrou que concessionárias como **Puget Sound Energy Inc.** e **City of Tacoma** já enfrentam uma carga potencial de cerca de **878 MWh diários**, apenas com a frota elétrica atual. Este dado é alarmante quando comparado às capacidades típicas dos alimentadores urbanos e sugere que, caso a taxa de adoção de VEs continue a crescer no ritmo atual, haverá necessidade premente de reforços estruturais na rede (IBRAHIM *et al.*, 2024).

Ademais, os achados reforçam o que foi apontado por Domínguez *et al.* (2024): a distribuição dos impactos da mobilidade elétrica não será homogênea, mas concentrada em determinadas concessionárias e regiões geográficas, refletindo padrões socioeconômicos e de infraestrutura já existentes.

Zaino *et al.* (2023) destacam que, em regiões com alta penetração de veículos elétricos, a gestão ativa da demanda (Demand Response - DR) e o uso de tecnologias de carregamento inteligente serão cruciais para mitigar os impactos na infraestrutura elétrica. Este estudo corrobora tal visão, ao mostrar que mesmo em um cenário onde a carga média por veículo é relativamente moderada (~20 kWh/dia), a soma agregada pode sobrecarregar rapidamente as redes locais.

Além disso, a elevada carga potencial estimada apenas para veículos BEV (excluindo híbridos plug-in e futuros veículos comerciais eletrificados) sugere que as projeções convencionais de demanda elétrica podem estar subestimando o impacto real da eletromobilidade, conforme advertido pela Agência Internacional de Energia (IEA) (Domínguez *et al.*, 2024).

5.2 Implicações para o Planejamento Energético

Os resultados deste estudo possuem importantes implicações para o planejamento energético a curto, médio e longo prazo. O Quadro 1 sintetiza as principais implicações identificadas, acompanhadas das estratégias sugeridas para mitigar os impactos decorrentes da expansão da mobilidade elétrica.

Quadro 1 – Implicações Identificadas para o Planejamento Energético diante da Expansão dos Veículos Elétricos

Implicação	Descrição	Estratégias Sugeridas
Investimentos em Infraestrutura	Necessidade de reforço e modernização de alimentadores, transformadores e estações de recarga para suportar o aumento de carga.	Ampliação de capacidade física, construção de novas subestações, adaptação de redes locais.
Implementação de Smart Charging	Gerenciamento ativo dos horários e potências de carregamento para evitar sobrecargas e otimizar a curva de demanda.	Incentivos tarifários para recarga fora do pico, desenvolvimento de plataformas de controle inteligente.
Integração de Tecnologias V2G	Utilização de veículos como unidades de armazenamento distribuído, permitindo devolução de energia à rede em horários críticos.	Desenvolvimento de regulamentação específica, incentivos para proprietários de veículos com capacidade V2G.
Planejamento Regionalizado	Necessidade de tratar a expansão elétrica de forma diferenciada, conforme a concentração de veículos por área.	Modelagem detalhada de crescimento da frota por região, previsão de hotspots de demanda.
Desenvolvimento de Modelos Preditivos	Inclusão da variável 'frota elétrica' em modelos de projeção de demanda de energia.	Utilização de dados reais de adoção de VEs, integração com softwares de simulação energética.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

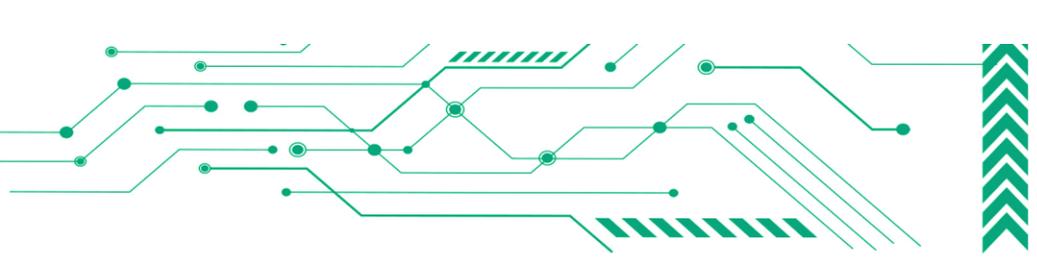
A necessidade de investimentos em infraestrutura de rede é evidente, considerando o aumento da demanda associado aos veículos elétricos. O reforço de alimentadores, transformadores e estações de recarga será essencial para garantir a estabilidade do fornecimento elétrico em regiões críticas (Ibrahim *et al.*, 2024).

Adicionalmente, a implementação de sistemas de carregamento inteligente (smart charging) surge como uma estratégia indispensável, permitindo o deslocamento da demanda de carregamento para horários de menor consumo, reduzindo a sobrecarga nas redes (Zaino *et al.*, 2023).

A integração de tecnologias Vehicle-to-Grid (V2G) também se apresenta como solução promissora, possibilitando que os próprios veículos elétricos atuem como recursos energéticos distribuídos, melhorando a flexibilidade e a resiliência do sistema elétrico (Jenn *et al.*, 2022).

Outro ponto crucial é o planejamento energético regionalizado. A forte concentração espacial dos veículos elétricos, conforme observado na análise, demanda um enfoque diferenciado conforme a localidade, evitando generalizações que poderiam comprometer a eficiência dos investimentos (Domínguez *et al.*, 2024).

Finalmente, destaca-se a necessidade de desenvolvimento e atualização contínua de modelos preditivos de demanda, que incorporem variáveis relacionadas à evolução da frota de veículos elétricos. Tais modelos serão



fundamentais para orientar a expansão da capacidade energética e para formular políticas públicas efetivas.

A síntese apresentada na Tabela 1 contribui para consolidar as diretrizes estratégicas que deverão orientar as concessionárias de energia, os planejadores do setor elétrico e os formuladores de políticas públicas nos próximos anos, com vistas à sustentabilidade ambiental desejável.

5.3 Tendências Futuras e Perspectivas

Considerando os achados desta pesquisa e a literatura internacional, as principais tendências para o futuro são:

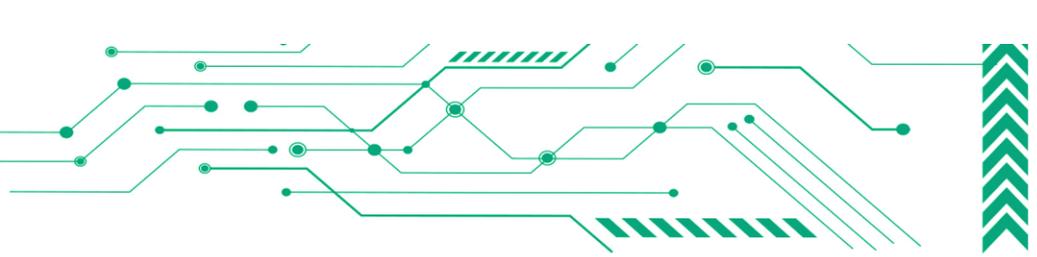
- **massificação da recarga inteligente** como prática padrão em residências e estabelecimentos comerciais;
- **uso crescente de V2G** para suporte de rede e participação dos VEs no mercado de energia;
- **expansão acelerada da infraestrutura de recarga rápida**, especialmente em corredores urbanos e rodoviários;
- **integração de armazenamento estacionário** para suavizar os impactos dos picos de demanda;
- **políticas públicas de incentivo à eficiência e à gestão de carga** para acelerar a transição energética sustentável.

Combinadas, essas tendências indicam que o sucesso da mobilidade elétrica dependerá não apenas do avanço tecnológico dos veículos em si, mas da capacidade do sistema elétrico de se adaptar, inovar e evoluir de maneira integrada e sustentável.

6 CONCLUSÕES

A ascensão da mobilidade elétrica é um fenômeno irreversível que molda de maneira profunda o futuro dos sistemas de transporte e de energia. Este estudo, fundamentado em dados reais e métodos quantitativos rigorosos, buscou analisar a carga potencial imposta pelos veículos elétricos (VEs) às redes de distribuição elétrica, bem como mapear sua distribuição espacial entre as concessionárias de energia. A análise revelou uma forte concentração geográfica da demanda, evidenciando que a infraestrutura elétrica atual poderá enfrentar severos desafios operacionais diante do crescimento acelerado da frota elétrica.

Os resultados obtidos confirmam que, embora os veículos elétricos sejam fundamentais para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a promoção de sistemas de transporte mais sustentáveis, eles também introduzem novas pressões sobre as redes de distribuição, que precisam ser reconhecidas e gerenciadas de forma proativa. Sem o planejamento adequado, estratégias de carregamento inteligente, adoção de tecnologias como Vehicle-to-Grid (V2G) e



investimentos em infraestrutura, a expansão da mobilidade elétrica poderá comprometer a confiabilidade do fornecimento elétrico em áreas críticas.

A relevância científica desta pesquisa reside na quantificação objetiva dos impactos potenciais dos VEs sobre a infraestrutura elétrica, tema ainda incipiente no Brasil e de crescente interesse internacional. Ao empregar uma abordagem baseada em dados reais, esta investigação contribui para a lacuna existente na literatura sobre o dimensionamento energético associado à eletromobilidade, fornecendo subsídios técnicos concretos para o planejamento energético estratégico.

No cenário atual, em que políticas públicas de incentivo aos veículos elétricos se proliferam e a pressão para descarbonização energética aumenta, compreender as interações entre o crescimento da frota elétrica e a infraestrutura de distribuição torna-se imprescindível. Este estudo oferece não apenas uma visão crítica sobre os desafios emergentes, mas também propõe diretrizes práticas para enfrentá-los, alinhando-se às tendências globais de inovação tecnológica, sustentabilidade e segurança energética.

Por fim, reforça-se a necessidade de que futuras pesquisas ampliem a análise para outros contextos geográficos, explorem cenários de adoção massiva com variáveis econômicas, ambientais e comportamentais, e avaliem o impacto de novas tecnologias de armazenamento e gerenciamento energético. A construção de sistemas elétricos resilientes, inteligentes e integrados à mobilidade elétrica não é apenas um desafio técnico, mas uma condição essencial para o sucesso da transição energética global.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados e das limitações identificados nesta pesquisa, surgem diversas oportunidades para o aprofundamento do tema e a expansão dos estudos relacionados à mobilidade elétrica e ao planejamento energético. As seguintes direções são sugeridas para trabalhos futuros:

- **análise em múltiplos contextos regionais e internacionais**, comparando os impactos da expansão da frota de veículos elétricos em diferentes matrizes energéticas e estruturas de distribuição;
- **simulações dinâmicas de carregamento inteligente e tecnologias Vehicle-to-Grid (V2G)**, avaliando o comportamento real de redes de distribuição em cenários de alta penetração de veículos elétricos;
- **desenvolvimento de modelos preditivos integrados**, incorporando variáveis socioeconômicas, padrões de mobilidade e políticas públicas de incentivo à eletromobilidade;
- **investigação dos impactos econômicos, ambientais e regulatórios** decorrentes da necessidade de expansão e modernização da infraestrutura elétrica frente à eletrificação da frota;
- **estudos de integração entre fontes renováveis intermitentes e a recarga de veículos elétricos**, visando a otimização do uso de energia limpa e a redução de picos de demanda.

Essas vertentes de pesquisa são fundamentais para a construção de soluções inovadoras que assegurem a sustentabilidade, a eficiência e a resiliência dos sistemas elétricos na era da mobilidade elétrica.

REFERÊNCIAS

ABVE. Veículos elétricos crescem em todo o país. **Associação Brasileira do Veículo Elétrico** – Notícia, 11 jan. 2024.

ALMEIDA, Edvan Carneiro. Análise do impacto de veículos elétricos na rede elétrica urbana. **Revista F&T**, 2024. Disponível em: https://revistافت.com.br/analise-do-impacto-de-veiculos-eletricos-na-rede-eletrica-urbana/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 20 abr. 2025.

BITENCOURT, L. *et al.* Bass diffusion model adaptation considering Public policies to improve electric vehicle sales: a brazilian case study. **Energies**, v. 14, n. 17, p. 5435, 2021.

CRIVELARO, L. **Infográfico reúne dados da atual situação de eletrificados no Brasil**. Canal VE – Notícia, 22 jan. 2025.

DOMÍNGUEZ, B. *et al.* Global EV Outlook 2024: Moving Towards Increased Affordability. **International Energy Agency (IEA)**, 2024.

GIBIN, W. O. **Electric Vehicle Population Data**. Kaggle, 2024. Disponível em: <https://www.kaggle.com/datasets/willianoliveiragibin/electric-vehicle-population>. Acesso em: 28 mar. 2025.

IBRAHIM, R. A. *et al.* Analysis of multidimensional impacts of electric vehicles penetration in distribution networks. **Scientific Reports**, v. 14, p. 27854, 2024.

JENN, A. *et al.* Distribution grid impacts of electric vehicles: A California case study. **Cell Reports Physical Science**, v. 3, n. 2, p. 100791, 2022.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

ZAINO, R. *et al.* Electric Vehicle Adoption: A Comprehensive Systematic Review of Technological, Environmental, Organizational and Policy Impacts. **World Electric Vehicle Journal**, v. 15, n. 8, p. 375, 2023.