

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção - PPGE
Mestrado Acadêmico em Engenharia de Produção

**GESTÃO DE DEMANDA EM INFRAESTRUTURA DE RECARGA DE VEÍCULOS
ELÉTRICOS: UM VETOR DE ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE**

Proponente: Maria Heloiza Soares Pacheco Moraes
maria.heloiza@posgrad.ufsc.br
(48) 99678-5463

Orientadora: Caroline Rodrigues Vaz

1 INTRODUÇÃO

A crescente adoção de veículos elétricos (VE) no contexto corporativo brasileiro reflete uma tendência global de transformação da mobilidade urbana, impulsionada por regulamentações ambientais, avanços tecnológicos e pressões por práticas ESG (*Environmental, Social and Governance*) nas empresas (IEA, 2023).

Neste contexto, a infraestrutura de recarga desponta como desafio estratégico para empresas que buscam integrar eficiência operacional, economia e sustentabilidade. O desenvolvimento dessa infraestrutura exige gestão inteligente alinhada às exigências regulatórias brasileiras, como define a NBR 17019 (ABNT, 2022).

A gestão de demanda energética, com destaque para *smart charging* e balanceamento dinâmico de carga, revela papel central na otimização do consumo elétrico, permitindo redução de picos, custos operacionais e impactos ambientais. Tais estratégias favorecem a integração com fontes renováveis, ampliando o potencial de sustentabilidade da mobilidade elétrica empresarial (FERREIRA; SILVA; ALMEIDA, 2024).

Apesar dos avanços recentes, o Brasil ainda enfrenta dificuldades para alinhar a adoção de veículos elétricos à gestão eficiente de sua infraestrutura de recarga (SEBRAE, 2023). O tema ganha relevância diante do aumento dos custos de energia, da necessidade de adequação a regulamentações ambientais e da pressão crescente por relatórios de sustentabilidade. Essa conjuntura evidencia que a simples instalação de pontos de recarga não é suficiente. É necessário implementar sistemas inteligentes que promovam eficiência energética e viabilidade econômica no longo prazo.

Outro aspecto crítico é que a maioria dos estudos disponíveis concentra-se em análises técnicas ou em experiências internacionais, deixando em segundo plano a realidade corporativa brasileira. Questões como a precificação da recarga, a integração com contratos de fornecimento de energia, e o impacto direto sobre indicadores financeiros e ambientais das empresas ainda carecem de investigação aprofundada. Essa lacuna limita a capacidade de gestores em fundamentar decisões estratégicas relacionadas à mobilidade elétrica.

Dessa forma, justifica-se a realização deste estudo, que busca consolidar referências teóricas e práticas para orientar empresas na adoção de tecnologias de gestão de recarga. Ao integrar dimensões técnicas, econômicas e de sustentabilidade, o artigo contribui para preencher o vazio existente na literatura e oferecer subsídios que apoiem tanto a formulação de políticas empresariais quanto o avanço da agenda ESG no Brasil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transição para modelos sustentáveis de mobilidade tem impulsionado a adoção de veículos elétricos em diversas frentes, sendo catalisada por fatores como regulamentações ambientais, avanços tecnológicos e pressões por práticas ESG nas empresas (MCKINSEY & COMPANY, 2022). A crescente eletrificação de frotas corporativas e a instalação de pontos de recarga em ambientes empresariais criam novas demandas gerenciais relacionadas ao consumo de energia, à infraestrutura elétrica e à eficiência operacional. Para responder a esses desafios, torna-se necessário compreender três dimensões fundamentais: a mobilidade elétrica e gestão de recarga, sustentabilidade corporativa e ESG, e a transformação digital aplicada à energia.

2.1 MOBILIDADE ELÉTRICA E A GESTÃO DE RECARGA

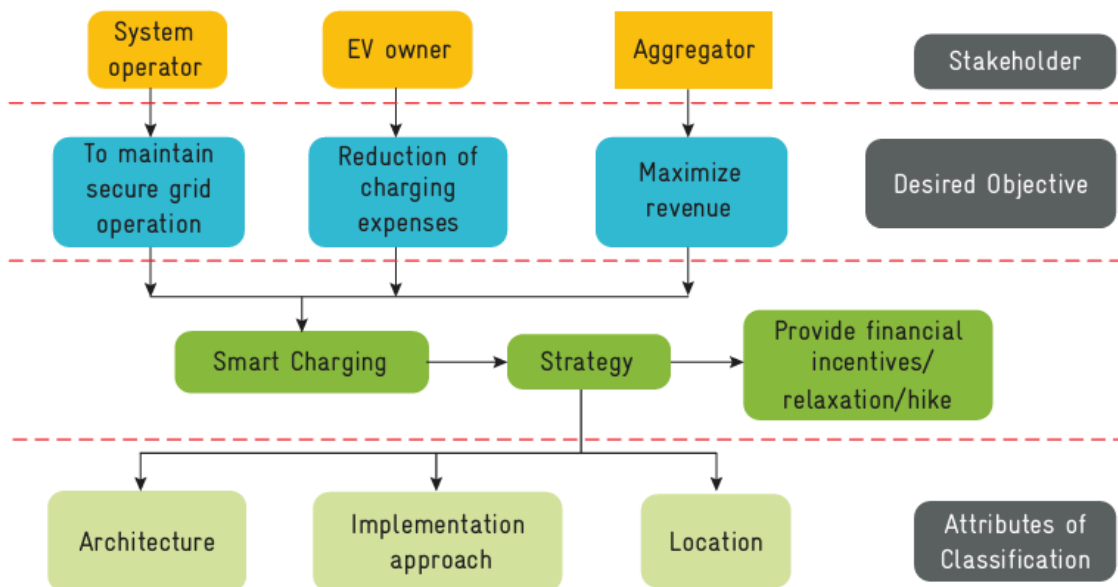
A gestão da recarga emerge como elemento crítico para a viabilidade econômica e energética da mobilidade elétrica. Tecnologias como *smart charging* permitem o controle

programado ou dinâmico do carregamento, ajustando potência conforme critérios técnicos, econômicos ou ambientais (CHERNOV, 2021).

A literatura científica consolidada demonstra que a gestão inteligente da recarga representa avanço fundamental para otimização energética. Estratégias de carregamento inteligente podem reduzir custos de recarga em até 30% e custos operacionais da rede elétrica em 10% (SADEGHIAN et al., 2022).

Motivadas por diferentes objetivos, como a redução de despesas de recarga para o usuário, a manutenção da operação segura da rede pelo operador do sistema e a maximização das receitas pelo agregador, essas estratégias são selecionadas considerando tanto as capacidades computacionais do sistema quanto os requisitos de comunicação, podendo assumir abordagens locais ou descentralizadas a depender do custo e da complexidade envolvida (Figura 1). Em contextos com infraestrutura mais simples, estratégias locais são preferidas, já sistemas mais sofisticados tendem ao uso de metodologias distribuídas, de modo a otimizar o desempenho global da recarga e fornecer incentivos financeiros aos envolvidos. Assim, a classificação de estratégias inteligentes de recarga envolve múltiplos atributos, como arquitetura, localização e método de implementação, refletindo a necessidade de soluções flexíveis e customizadas para diferentes cenários corporativos e urbanos (INTERNATIONAL CLIMATE INITIATIVE, 2021).

Figura 1 - Motivação para o *Smart Charging*



Fonte: *International Climate Initiative*

2.2 SUSTENTABILIDADE CORPORATIVA E ESG

A integração entre *smart charging* e sustentabilidade corporativa transcende a simples redução de emissões, configurando-se como vetor estratégico para alcance de metas ESG. A implementação dessas estratégias pode reduzir o corte na geração de energias renováveis em até 40%, promovendo maior aproveitamento de fontes limpas (SADEGHIAN et al., 2022). No contexto corporativo, essas tecnologias viabilizam integração sistemática entre infraestrutura de recarga e geração renovável distribuída, criando ecossistemas energéticos autossustentáveis que reduzem custos com energia elétrica e facilitam participação em mercados de serviços auxiliares.

O relatório do *NewClimate Institute* (2025) reforça que a definição de metas climáticas corporativas claras, que incluam o consumo energético de frotas de veículos elétricos, é fundamental para a efetiva redução das emissões corporativas de gases de efeito estufa (GEE). Destaca-se que a adoção de estratégias de *smart charging*, especialmente quando integrada a fontes renováveis, configura-se como uma ferramenta estratégica para a gestão do Escopo 3, contribuindo para o alinhamento das empresas com compromissos ESG e regulatórios rigorosos. Essa abordagem ressalta a importância da gestão inteligente da recarga não apenas para eficiência operacional e redução de custos, mas também como alavanca central de sustentabilidade corporativa

2.3 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL APLICADA À ENERGIA

Plataformas digitais baseadas em nuvem emergem como soluções centralizadas para monitoramento e controle remoto de infraestruturas distribuídas. Essas soluções utilizam sensores para coleta contínua de dados operacionais, permitindo otimização dinâmica do consumo energético (KUMAR et al., 2020).

A convergência entre a solução sensorial e sistemas de gestão energética viabiliza "ambientes energeticamente conscientes" que coordenam automaticamente dispositivos com medição inteligente, possibilitando respostas dinâmicas à demanda (SONG, 2025).

A interseção entre mobilidade elétrica, sustentabilidade corporativa e transformação digital configura um ecossistema tecnológico que permite às empresas otimizar simultaneamente performance financeira e ambiental, estabelecendo as bases metodológicas para análise empírica dessas sinergias.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa configura-se como revisão bibliográfica integrativa de caráter descritivo-exploratório, com abordagem qualitativa, focada na análise da gestão de demanda em infraestrutura de recarga como vetor de economia e sustentabilidade corporativa.

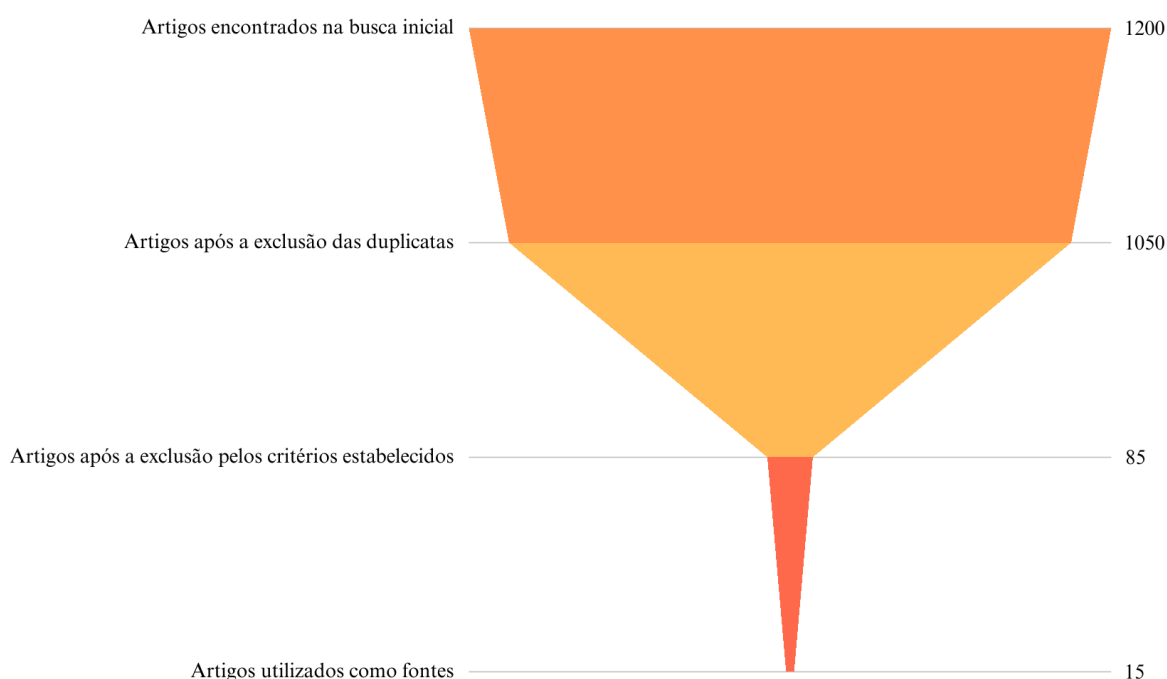
A coleta de dados foi realizada entre julho e agosto de 2025, através de busca sistemática em bases acadêmicas internacionais (IEEE Xplore, ScienceDirect, Springer Link, Nature) utilizando descritores: "gestão de demanda", "*smart charging*", "*load balance*", "sustentabilidade corporativa", "*demand side management*", "*electric vehicle charging infrastructure*". As bases acadêmicas foram selecionadas por sua relevância na área de engenharia, gestão e tecnologias emergentes. O IEEE Xplore por ser uma referência em estudos de sistemas elétricos e tecnologias digitais, o ScienceDirect e Springer Link por sua abrangência multidisciplinar em engenharia e sustentabilidade e Nature pelas publicações de alto impacto em inovação tecnológica.

A estratégia de busca utilizou combinações booleanas entre descritores em português e inglês, de forma a ampliar a cobertura dos resultados. A *string* completa aplicada foi: ("gestão de demanda" OR "*demand side management*") AND ("*smart charging*" OR "*charge management*") AND ("*load balance*" OR "*dynamic load management*") AND ("sustentabilidade corporativa" OR "*corporate sustainability*") AND ("*electric vehicle charging infrastructure*").

Como critérios de inclusão foram definidas publicações entre 2020 e 2025, estudos focados em aplicações empresariais e pesquisas abordando tecnologias de gestão inteligente de energia. Já os critérios de exclusão foram estudos limitados a aspectos técnicos de baterias, pesquisas focadas exclusivamente em infraestrutura residencial e publicações sem metodologia científica clara. Foram inicialmente recuperadas cerca de 1.200 publicações. Após a exclusão de duplicatas, leitura crítica de títulos, resumos e aplicação dos critérios de

inclusão e exclusão, restaram 85 estudos para análise completa e destes, 15 foram utilizados como fontes para o trabalho. Um fluxograma ilustrativo (Figura 2) detalha cada etapa desse processo seletivo.

Figura 2 - Fluxograma de seleção de referências



Fonte: Elaboração própria

Este conjunto final de estudos inclui pesquisas acerca de gestão de recarga de veículos elétricos no contexto corporativo, plataformas digitais de monitoramento, tecnologias de balanceamento dinâmico de carga, bem como análises dos benefícios econômicos e ambientais e das principais barreiras e recomendações práticas para implementação.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos estudos selecionados, todos com foco em gestão e tecnologias de gestão de recarga de veículos elétricos, está organizada em três eixos: aplicação de plataformas digitais de monitoramento e controle; tecnologias de balanceamento de carga; e benefícios econômicos e ambientais quantificados.

4.1 PLATAFORMAS DIGITAIS DE MONITORAMENTO E CONTROLE

Kumar et al. (2020) demonstram que plataformas inteligentes baseadas em nuvem oferecem monitoramento em tempo real de parâmetros críticos das estações de recarga, como tensão e corrente, permitindo detecção precoce de anomalias e emissão de alertas para manutenção preditiva. O *framework* proposto integra dados de múltiplas estações, consolida informações em dashboards acessíveis e automatiza ajustes de potência, garantindo operação contínua e redução de falhas.

4.2 TECNOLOGIAS DE BALANCEAMENTO DINÂMICO DE CARGA

O balanceamento dinâmico de carga (DLB) é uma tecnologia fundamental para a operação eficiente de múltiplos pontos de recarga de veículos elétricos, prevenindo sobrecargas na rede e evitando investimentos em reforço de infraestrutura. Conforme Karthikeyan e Thomas (2024), o DLB distribui, em tempo real, a potência disponível entre os carregadores com base em algoritmos de otimização que consideram variáveis como demanda instantânea, perfil de uso da frota, tarifas horárias e disponibilidade de energia renovável. Essa abordagem permite escalonar sessões de recarga de maneira automática, reduzindo custos de energia e maximizando a eficiência do sistema, ao mesmo tempo em que mantém a estabilidade da rede.

Além da simples distribuição de potência, métodos avançados são empregados para prever e ajustar o carregamento de acordo com padrões de uso e condições da rede. O DLB também pode ser integrado a tecnologias *Vehicle-to-Grid* (V2G), permitindo que os veículos não apenas consumam, mas também devolvam energia à rede, contribuindo para estabilidade elétrica e geração de receita. A adoção dessa tecnologia, quando autorizada, em ambientes corporativos favorece a redução de custos operacionais, a integração com fontes renováveis e a melhoria da experiência do usuário, configurando-se como elemento estratégico para a sustentabilidade e a eficiência energética.

4.3 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Sadeghian et al. (2022) quantificam que a adoção de estratégias de *smart charging*, incluindo balanceamento de carga e agendamento de recargas fora de pico, pode reduzir custos de energia elétrica em até 30% e custos operacionais em 10%. Patel et al. (2025) relatam *payback* de 18–24 meses para investimentos em plataformas completas de gestão de recarga, calculado a partir das economias de energia e das receitas geradas por serviços auxiliares de rede (V2G).

Além dos benefícios econômicos, o balanceamento dinâmico de carga e o agendamento coordenado da recarga de veículos elétricos promovem impactos ambientais significativos. Conforme Karthikeyan e Thomas (2024), a aplicação de uma abordagem multiobjetivo tecno-econômico-ambiental na gestão da recarga pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como CO₂, em até 34% em comparação ao carregamento não regulado. Essa redução substancial decorre da integração otimizada de fontes renováveis de energia e do uso eficiente de algoritmos avançados para minimizar picos de demanda, contribuindo

decisivamente para a sustentabilidade ambiental das frotas corporativas e para o alinhamento das organizações às metas ESG.

4.4 DESAFIOS E RECOMENDAÇÕES

Embora os estudos revisados evidenciam ganhos significativos em eficiência e sustentabilidade, a adoção de plataformas de gestão de recarga enfrenta barreiras relevantes. A integração dessas soluções com sistemas legados de gestão predial e de tecnologia da informação demanda esforços de compatibilização entre diferentes protocolos e padrões de comunicação, o que pode elevar a complexidade dos projetos iniciais de implementação (KUMAR ET AL., 2020).

Além disso, a operação eficiente das plataformas deve considerar a complexidade dos algoritmos de DLB, que requerem conhecimentos especializados para ajuste, exigindo investimento em capacitação específica para a equipe técnica responsável (KARTHIKEYAN; THOMAS, 2024). A integração dessas tecnologias com sistemas existentes demanda esforços contínuos para lidar com protocolos distintos e assegurar a estabilidade do sistema elétrico.

No âmbito regulatório, embora haja potencial para ganhos energéticos significativos por meio da integração de conceitos como *Vehicle-to-Grid*, a coordenação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios quanto à regulamentação e remuneração adequada, o que pode impactar a viabilidade econômica e operacional do balanceamento dinâmico em larga escala (KARTHIKEYAN; THOMAS, 2024).

Para superar essas barreiras, recomenda-se implantar essas redes por meio de projetos-piloto em pequena escala, permitindo validar localmente os ganhos de eficiência antes de expandir para toda a frota (INTERNATIONAL CLIMATE INITIATIVE, 2021). Uma abordagem modular de implementação, que comece pelo monitoramento e agendamento de recargas e evolua gradualmente para incluir balanceamento dinâmico de carga e integração V2G, ajuda a mitigar riscos operacionais e facilita a adaptação progressiva das equipes. Por fim, a definição de indicadores de desempenho energético e ESG integrados em dashboards unificados proporciona visibilidade contínua dos resultados, apoiando a tomada de decisão baseada em dados e fortalecendo o compromisso corporativo com metas de sustentabilidade. A tabela 1 apresenta de forma prática diretrizes para implantação desse processo.

Tabela 1 - Diretrizes para implantação de soluções para gestão de demanda de recarga de veículos elétricos em ambientes corporativos

Etapa	Diretriz	Objetivo
Implantar plataforma digital de monitoramento.	Selecionar e instalar uma plataforma em nuvem com monitoramento em tempo real, dashboards intuitivos, manutenção preditiva e integração com sistemas corporativos (KUMAR ET AL, 2020).	Garantir visibilidade total da infraestrutura de recarga e controle operacional eficiente.
Iniciar projeto-piloto de balanceamento dinâmico.	Implementar algoritmo de distribuição automática de potência entre múltiplos carregadores em uma unidade piloto (INTERNATIONAL CLIMATE INITIATIVE, 2021).	Reduzir sobrecarga elétrica, otimizar uso da rede e adiar investimentos em reforço de infraestrutura.

Mensurar benefícios econômicos e ambientais.	Monitorar e registrar dados de economia de energia, custos evitados, redução de emissões de CO ₂ e alinhamento às metas ESG (SADEGHIAN et al., 2022).	Demonstrar retorno financeiro e impacto ambiental positivo para justificar expansão.
Escalar e avançar para funcionalidades complexas.	Expandir o uso de balanceamento dinâmico, implementar V2G quando viável, integrar com geração renovável e serviços auxiliares (KUMAR ET AL, 2020).	Maximizar benefícios econômicos, ambientais e de resiliência energética.
Capacitar equipe e alinhar com reguladores.	Treinar gestores e operadores, criar protocolos internos de resposta à demanda e manter alinhamento com normas e incentivos vigentes (KARTHIKEYAN; THOMAS, 2024).	Garantir operação eficiente, conformidade regulatória e aproveitamento de oportunidades de incentivo fiscal e tarifário.

Fonte: Elaboração própria.

Em síntese, as evidências acadêmicas indicam que a gestão de recarga de veículos elétricos, suportada por plataformas digitais avançadas e tecnologias de balanceamento dinâmico de carga, constitui vetor robusto de economia operacional e redução de emissões, desde que acompanhada de estratégias de implantação gradual e capacitação técnica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão bibliográfica integrativa sintetizou evidências científicas recentes sobre a gestão de demanda em infraestrutura de recarga de veículos elétricos no contexto corporativo, com foco em empresas privadas que possuem frotas ou redes próprias de carregamento. Ao integrar perspectivas de mobilidade elétrica, sustentabilidade corporativa e transformação digital, o estudo demonstrou como plataformas digitais de gestão, algoritmos de balanceamento dinâmico de carga e integração com fontes renováveis podem se constituir em vetores robustos de economia operacional e de redução de impactos ambientais.

Os resultados mostraram benefícios econômicos expressivos e ambientais igualmente relevantes, incluindo até 34% menos emissões de CO₂ quando aplicado um modelo multiobjetivo tecno-econômico-ambiental de gestão de recarga. Tais resultados reforçam que a adoção coordenada de *smart charging*, associada ao aproveitamento de fontes renováveis, contribui diretamente para metas ESG e para a transição energética.

Apesar dos ganhos demonstrados, a pesquisa identificou barreiras importantes, como dificuldades de integração, necessidade de capacitação técnica e lacunas regulatórias para a monetização de serviços auxiliares, como o V2G. Para superá-las, o artigo propôs diretrizes práticas organizadas em cinco etapas sequenciais: (i) implantação de plataformas digitais de monitoramento em nuvem com dashboards intuitivos e manutenção preditiva; (ii) desenvolvimento de projetos-piloto de balanceamento dinâmico para distribuição automática de potência entre múltiplos carregadores; (iii) mensuração sistemática de benefícios econômicos e ambientais através do registro de dados de economia energética, custos evitados e redução de emissões de CO₂; (iv) escalabilidade gradual para funcionalidades complexas,

incluindo integração V2G e serviços auxiliares quando viável; e (v) capacitação contínua de equipes e alinhamento regulatório para garantir conformidade normativa e aproveitamento de incentivos fiscais e tarifários. Essa abordagem modular permite validação local dos ganhos antes da expansão para toda a frota, mitigando riscos operacionais e assegurando métricas claras de desempenho energético e ambiental.

No campo teórico, esta pesquisa contribui ao consolidar o estado da arte sobre tecnologias e modelos de gestão de recarga voltados ao setor corporativo, preenchendo a lacuna de estudos focados no contexto brasileiro. No campo prático, oferece às empresas um roteiro estruturado para implementação de soluções que conciliam eficiência energética, retorno financeiro e sustentabilidade ambiental.

Futuras investigações podem aprofundar a análise econômica de modelos V2G, examinar a integração dessas tecnologias com outras fontes distribuídas e avaliar impactos de longo prazo sobre indicadores ESG no contexto regulatório nacional. A adoção efetiva das práticas aqui sintetizadas pode consolidar a gestão inteligente de recarga como elemento estratégico para empresas que buscam competitividade, inovação e alinhamento às demandas da sociedade por uma mobilidade mais limpa e eficiente.

5 REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17019: instalação de carregadores de veículos elétricos. Rio de Janeiro, 2022.

CHERNOV, Ivan et al. Smart charging technologies for electric vehicle fleets: control strategies and economic analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 12, n. 3, p. 2345–2356, 2021.

FERREIRA, José Rodrigo Santos; SILVA, Kessiane de Sousa; ALMEIDA, Edvan Carneiro. Análise do impacto de veículos elétricos na rede elétrica urbana. *Revista Fatores de Transferência*, v. 18, n. 2, p. 1–22, 2024. DOI: 10.69849/revistaft/ra10202411241232.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 27 jul. 2025.

INTERNATIONAL CLIMATE INITIATIVE (IKI). *Smart Charging Strategies and Technologies for Electric Vehicles*. 2021. Disponível em: <https://www.international-climate-initiative.com/en/iki-media/publication/smart-charging-strategies-and-technologies-for-electric-vehicles/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

KARTHIKEYAN, R.; THOMAS, A. Dynamic load balancing strategies for electric vehicle charging infrastructure. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3239015>. Acesso em: 13 ago. 2025.

KUMAR, R. S. et al. IoT-based monitoring and management of electric vehicle charging systems for DC fast charging facility. In: *Internet of Things for Industry 4.0*. Springer, Cham, 2020. p. 199–218.

MCKINSEY & COMPANY. *ESG Report 2022: Creating a more sustainable, inclusive future for all*. McKinsey & Company, 2022. Disponível em:

<https://www.mckinsey.com/spcontent/bespoke/esg-2023-sean/pdfs/esg-report-2022-aw6-v12-final.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2025.

NEWCLIMATE INSTITUTE. Evolution of corporate climate targets. Berlin; Cologne: NewClimate Institute, Jan. 2025. Disponível em: https://newclimate.org/sites/default/files/2025-01/Report_Corporate%20Scope%20Target%20Frameworks.pdf. Acesso em: 31 ago. 2025.

PATEL, A. et al. Business models and economic analysis for V2G integration in corporate fleets. *Applied Energy*, v. 298, p. 117248, 2025. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117248.

SADEGHIAN, Omid et al. A comprehensive review on electric vehicles smart charging: solutions, strategies, technologies, and challenges. *Journal of Energy Storage*, v. 54, p. 105241, 2022. DOI: 10.1016/j.est.2022.105241.

SEBRAE. Carros elétricos: desafios e oportunidades no Brasil. São Paulo, 22 maio 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/carros-eletricos-desafios-e-oportunidades-no-brasil,6d088e029bf28810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 08 ago. 2025.

SONG, Feng. The effects of digital transformation on corporate energy efficiency: a supply chain spillover perspective. *Frontiers in Sustainability*, v. 6, p. 1567413, 2025. DOI: 10.3389/frsus.2025.1567413.