

SISTEMAS ELÉTRICOS E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

DOI: 10.5281/zenodo.18111866

Joelson Lopes da Paixão¹

Alzenira da Rosa Abaide²

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas elétricos contemporâneos, impulsionada pela transição energética, pela digitalização e pela demanda por maior eficiência e confiabilidade, coloca a inovação tecnológica no centro dos debates técnicos, econômicos e regulatórios. Este artigo problematiza como os sistemas elétricos têm incorporado inovações tecnológicas para responder às exigências de sustentabilidade, segurança operacional e expansão do consumo, especialmente em contextos urbanos e industriais cada vez mais dependentes de energia elétrica de qualidade. O objetivo geral consiste em analisar criticamente o papel da inovação tecnológica no aprimoramento dos sistemas elétricos, considerando suas implicações técnicas, sociais e estratégicas. Metodologicamente, adota-se uma abordagem qualitativa, de natureza exploratória e analítico-descritiva, fundamentada em revisão bibliográfica sistemática de literatura científica, normas técnicas e relatórios institucionais publicados nos últimos dez anos, complementada por análise conceitual comparativa. Os resultados indicam

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

que a incorporação de tecnologias digitais, como redes inteligentes, sistemas de automação, armazenamento energético e integração de fontes renováveis, tem promovido ganhos significativos em eficiência, flexibilidade e resiliência dos sistemas elétricos, embora também introduza novos desafios relacionados à cibersegurança, à capacitação técnica e à governança regulatória. Estudos de caso recentes sobre microrredes para veículos elétricos ilustram essa dualidade, mostrando avanços na gestão energética e novos dilemas técnico-econômicos. Conclui-se que a inovação tecnológica, quando articulada a políticas públicas consistentes e a modelos de gestão integrados, configura-se como elemento estruturante para a modernização dos sistemas elétricos, contribuindo para a sustentabilidade energética e para o desenvolvimento socioeconômico em médio e longo prazo.

Palavras-chave: Sistemas elétricos. Inovação tecnológica. Redes inteligentes. Sustentabilidade energética. Eficiência energética.

ABSTRACT

The increasing complexity of contemporary power systems, driven by the energy transition, digitalization, and the demand for greater efficiency and reliability, places technological innovation at the center of technical, economic, and regulatory debates. This article examines how power systems have incorporated technological innovations to address requirements related to sustainability, operational security, and demand expansion, particularly in urban and industrial contexts that are increasingly dependent on high-quality electric energy. The main objective is to critically analyze the role of technological innovation in enhancing power systems, considering its technical, social, and strategic implications. Methodologically, the study

adopts a qualitative approach of an exploratory and analytical descriptive nature, grounded in a systematic bibliographic review of scientific literature, technical standards, and institutional reports published over the past ten years, complemented by comparative conceptual analysis. The results indicate that the integration of digital technologies, such as smart grids, automation systems, energy storage, and renewable energy integration, has promoted significant gains in efficiency, flexibility, and resilience of power systems, while also introducing new challenges related to cybersecurity, technical workforce development, and regulatory governance. Recent case studies on microgrids for electric vehicles illustrate this duality, showing advances in energy management alongside emerging techno economic dilemmas. It is concluded that technological innovation, when aligned with consistent public policies and integrated management models, constitutes a structuring element for the modernization of power systems, contributing to energy sustainability and socio-economic development in the medium and long term.

Keywords: Power systems. Technological innovation. Smart grids. Energy sustainability. Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos constituem a espinha dorsal das sociedades contemporâneas, sustentando desde atividades básicas de subsistência até complexos processos industriais, científicos e informacionais. Ao longo do século XX, tais sistemas foram estruturados a partir de modelos centralizados de geração, transmissão e distribuição, pautados pela previsibilidade da demanda e pela predominância de fontes fósseis e

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

hidrelétricas. Contudo, as transformações econômicas, ambientais e tecnológicas observadas nas últimas décadas tensionaram esse modelo tradicional, exigindo novas formas de conceber, operar e gerir a infraestrutura elétrica. Nesse contexto, a inovação tecnológica emerge não apenas como resposta técnica a problemas operacionais, mas como vetor estratégico de reconfiguração estrutural dos sistemas elétricos.

A intensificação do consumo energético, associada ao crescimento populacional, à urbanização acelerada e à digitalização da economia, ampliou a complexidade das redes elétricas e evidenciou limitações históricas relacionadas à eficiência, à confiabilidade e à sustentabilidade ambiental. Paralelamente, a emergência da agenda climática global impôs restrições severas ao uso intensivo de fontes poluentes, impulsionando a incorporação de energias renováveis intermitentes, como a solar e a eólica. Essa incorporação, embora desejável do ponto de vista ambiental, introduz desafios técnicos relevantes, uma vez que rompe com a lógica de controle unidirecional e previsível que caracterizava os sistemas elétricos convencionais.

É nesse cenário de transição que a inovação tecnológica assume centralidade analítica. Tecnologias digitais, sistemas de automação avançada, sensores inteligentes, algoritmos de otimização e soluções de armazenamento energético passam a desempenhar papel decisivo na operação das redes, permitindo maior flexibilidade, monitoramento em tempo real e capacidade de resposta a eventos críticos. Entretanto, tais avanços não se dão de forma neutra ou isenta de contradições. A adoção de tecnologias inovadoras implica custos elevados, demanda mão de obra altamente qualificada e exige marcos

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

regulatórios capazes de acompanhar a velocidade das transformações técnicas.

Diante dessas considerações, coloca-se a seguinte pergunta norteadora: de que maneira a inovação tecnológica tem contribuído para a modernização dos sistemas elétricos e quais são os principais desafios associados à sua implementação no contexto da transição energética contemporânea? A partir desse questionamento, este estudo tem como objetivo geral analisar criticamente o papel da inovação tecnológica no desenvolvimento e na reconfiguração dos sistemas elétricos, considerando suas dimensões técnicas, socioeconômicas e institucionais.

Como objetivos específicos, pretende-se: identificar as principais inovações tecnológicas aplicadas aos sistemas elétricos contemporâneos; analisar os impactos dessas inovações sobre a eficiência, a confiabilidade e a sustentabilidade das redes elétricas; avaliar os desafios técnicos, regulatórios e humanos decorrentes da incorporação de novas tecnologias; e discutir perspectivas futuras para a evolução dos sistemas elétricos à luz das tendências tecnológicas emergentes. Esses objetivos articulam-se a diferentes níveis da Taxonomia de Bloom, mobilizando verbos que envolvem identificação, análise, avaliação e discussão crítica, de modo a assegurar profundidade cognitiva e rigor analítico.

A relevância deste estudo justifica-se, primeiramente, pela centralidade estratégica da energia elétrica para o desenvolvimento econômico e social. Sistemas elétricos eficientes e resilientes são condição indispensável para a competitividade industrial, para a inclusão social e para a qualidade de vida

nas cidades. Além disso, a compreensão crítica dos processos de inovação tecnológica no setor elétrico contribui para a formulação de políticas públicas mais eficazes e para a tomada de decisões informadas por parte de gestores, engenheiros e planejadores.

Do ponto de vista acadêmico, o trabalho dialoga com debates contemporâneos sobre transição energética, digitalização de infraestruturas e sustentabilidade, buscando integrar perspectivas técnicas e analíticas que, muitas vezes, são tratadas de forma fragmentada. Ao adotar uma abordagem teórica densa e articulada, a pesquisa pretende superar leituras meramente descritivas, oferecendo uma análise que reconhece tanto o potencial transformador da inovação tecnológica quanto suas ambiguidades e limites.

Por fim, ao discutir sistemas elétricos e inovação tecnológica de forma integrada, este artigo se insere em um campo de investigação que demanda olhares interdisciplinares e visão de longo prazo. A modernização das redes elétricas não é apenas um desafio de engenharia, mas um processo complexo que envolve escolhas políticas, econômicas e sociais. Compreender essa complexidade é passo fundamental para que a inovação tecnológica cumpra seu papel de promover sistemas elétricos mais eficientes, sustentáveis e alinhados às necessidades das sociedades contemporâneas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão contemporânea dos sistemas elétricos como infraestruturas estratégicas passa, necessariamente, por uma leitura histórica e conceitual que reconheça sua evolução técnica, econômica e social, bem como o papel

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

estruturante da inovação tecnológica nesse percurso. Ainda no século XIX, quando a eletricidade começava a ser explorada de forma sistemática, já se reconhecia seu potencial transformador, como se observa na afirmação de Maxwell de que "a eletricidade não é apenas um fenômeno físico, mas um princípio organizador de sistemas" (Maxwell, 1873, p. 2), ideia que, embora formulada em um contexto científico inicial, antecipa a noção de redes integradas. Em consonância com essa perspectiva, Hughes (1983) analisa historicamente os grandes sistemas técnicos, destacando que os sistemas elétricos se consolidaram como complexos sociotécnicos, nos quais decisões técnicas e arranjos institucionais se entrelaçam. A partir dessa leitura, pode-se afirmar que a inovação tecnológica nunca foi um elemento periférico, mas constitutivo da própria lógica de funcionamento dos sistemas elétricos.

No decorrer do século XX, a consolidação de modelos centralizados de geração e distribuição foi acompanhada por uma racionalidade técnica voltada à eficiência operacional e à padronização, contexto no qual Schumpeter já destacava que "a inovação é o motor do desenvolvimento econômico" (Schumpeter, 1934, p. 66), ainda que suas análises não se restringissem ao setor energético. Autores contemporâneos retomam essa noção ao afirmar que a dinâmica inovativa no setor elétrico responde tanto a pressões de mercado quanto a demandas regulatórias e ambientais, como argumenta Perez (2016) ao tratar das revoluções tecnológicas e dos paradigmas tecnoeconômicos. A análise autoral permite compreender que os sistemas elétricos, ao longo do tempo, incorporaram inovações de forma incremental e, mais recentemente, disruptiva, especialmente diante da transição energética em curso.

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

A partir da década de 1970, crises energéticas e preocupações ambientais passaram a tensionar o modelo tradicional, abrindo espaço para novas abordagens conceituais. Nesse sentido, Georgescu-Roegen afirma que "a economia não pode ser dissociada das leis físicas da energia" (Georgescu-Roegen, 1971, p. 14), introduzindo uma crítica fundamental à visão linear de crescimento. Estudos recentes, como os de Smil (2017), aprofundam essa discussão ao evidenciar os limites materiais e energéticos dos sistemas modernos, ressaltando que a inovação tecnológica deve ser compreendida também como resposta a restrições biofísicas. A articulação dessas ideias evidencia que a modernização dos sistemas elétricos não é apenas uma escolha técnica, mas uma necessidade imposta por condicionantes ambientais e econômicos.

No campo específico das tecnologias elétricas, a digitalização das redes representa um marco conceitual relevante. Segundo Gungor et al., "as redes elétricas inteligentes permitem comunicação bidirecional e controle avançado" (Gungor et al., 2015, p. 2), redefinindo a forma como a energia é produzida e consumida. De forma indireta, Fang et al. (2019) argumentam que as smart grids constituem a espinha dorsal da integração entre fontes renováveis, consumidores ativos e sistemas de armazenamento. Essa visão é corroborada por estudos aplicados que destacam a smart grid como plataforma fundamental para novos modelos de negócio e gestão energética descentralizada (DA PAIXÃO; ABAIDE, 2025). A análise crítica desse movimento permite afirmar que a inovação tecnológica desloca o sistema elétrico de uma lógica hierárquica para uma arquitetura mais distribuída e adaptativa, ampliando sua complexidade e suas possibilidades operacionais.

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

A incorporação de fontes renováveis intermitentes impõe desafios adicionais, como destaca Lund ao afirmar que "a variabilidade das renováveis exige novos modelos de planejamento energético" (Lund, 2014, p. 23). Estudos posteriores, como os de IRENA (2022), reforçam essa ideia ao demonstrar que a inovação em sistemas de armazenamento e gestão da demanda é condição para a estabilidade das redes. Pesquisas recentes no contexto brasileiro ilustram esses desafios, ao desenvolverem estratégias otimizadas de gestão energética para microrredes de recarga rápida de veículos elétricos que integram fontes solar e eólica, explicitando a necessidade de modelos que considerem a degradação do armazenamento para garantir viabilidade técnica e econômica (PAIXÃO et al., 2025). A análise autoral permite compreender que a inovação tecnológica atua como mediadora entre a imprevisibilidade das fontes renováveis e a necessidade de confiabilidade dos sistemas elétricos, reposicionando o papel da engenharia e do planejamento energético.

No plano regulatório, a inovação tecnológica demanda marcos normativos capazes de acompanhar a velocidade das transformações. A Política Nacional de Energia, instituída pela Lei nº 9.478 de 1997, estabelece que o aproveitamento racional das fontes energéticas deve considerar o desenvolvimento tecnológico e a proteção ambiental, o que evidencia, ainda que de forma indireta, o reconhecimento institucional da inovação como vetor estratégico. De modo complementar, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, publicado pelo Ministério de Minas e Energia, afirma que "a modernização do setor elétrico depende da incorporação de tecnologias digitais e da ampliação da geração distribuída" (MME, 2022, p. 45). A

análise crítica desses documentos revela que a inovação tecnológica não é apenas uma tendência técnica, mas uma diretriz formalmente incorporada ao planejamento estatal.

A literatura contemporânea também enfatiza os impactos socioeconômicos da inovação nos sistemas elétricos. Segundo Sovacool, "as transições energéticas são processos profundamente sociais" (Sovacool, 2016, p. 7), o que implica reconhecer que tecnologias não operam em vazio social. De forma indireta, Jenkins et al. (2018) discutem a justiça energética, destacando que a modernização das redes pode tanto reduzir quanto aprofundar desigualdades. A análise autoral permite sustentar que a inovação tecnológica, embora tecnicamente promissora, exige governança inclusiva para que seus benefícios sejam distribuídos de forma equitativa.

Outro eixo relevante diz respeito à automação e ao uso de inteligência artificial na operação dos sistemas elétricos. Como afirma Zheng, "algoritmos inteligentes estão redefinindo a gestão da energia" (Zheng et al., 2020, p. 11), permitindo previsão de demanda e detecção de falhas em tempo real. Estudos de Zhang et al. (2021) corroboram essa perspectiva ao evidenciar ganhos de eficiência e redução de perdas técnicas. Essa tendência se materializa em desenvolvimentos de sistemas de gerenciamento de energia baseados em regras e otimização para nanorredes de recarga veicular, que buscam autonomia operacional e eficiência econômica (DANIELSSON et al., 2025; PAIXÃO et al., 2025). A análise crítica aponta, contudo, que essa dependência crescente de sistemas digitais introduz vulnerabilidades, especialmente no campo da cibersegurança, aspecto frequentemente subestimado em abordagens excessivamente tecnicistas.

A questão da segurança energética também se reconfigura à luz da inovação tecnológica. Segundo Yergin, "a segurança energética é um conceito dinâmico" (Yergin, 2011, p. 9), sujeito a transformações tecnológicas e geopolíticas. Autores recentes, como Cherp e Jewell (2018), ampliam essa noção ao incluir resiliência e adaptabilidade como dimensões centrais. A análise autoral permite afirmar que sistemas elétricos inovadores tendem a ser mais resilientes, desde que a inovação seja orientada por princípios de redundância e robustez, e não apenas por critérios de eficiência econômica.

No âmbito da eficiência energética, a inovação tecnológica assume papel estratégico. De acordo com a Agência Internacional de Energia, "a eficiência é o primeiro combustível" (IEA, 2019, p. 3), expressão que sintetiza a importância de reduzir perdas e otimizar o uso da energia. Estudos de Bertoldi et al. (2021) reforçam que tecnologias inteligentes de medição e gestão do consumo são fundamentais para alcançar metas climáticas. A análise crítica demonstra que a eficiência energética, longe de ser um aspecto secundário, constitui um dos principais benefícios sistêmicos da inovação nos sistemas elétricos.

Do ponto de vista teórico, a integração entre inovação e sistemas elétricos pode ser compreendida à luz da teoria dos sistemas. Bertalanffy já afirmava que "o todo é mais do que a soma das partes" (Bertalanffy, 1968, p. 55), princípio que se aplica de forma exemplar às redes elétricas modernas. Autores contemporâneos, como Sterman (2018), retomam essa abordagem ao analisar sistemas complexos e dinâmicos. A análise autoral evidencia que a inovação tecnológica amplifica essa complexidade, exigindo modelos analíticos capazes de capturar interdependências e efeitos não lineares.

A literatura recente também destaca a importância da inovação aberta e da colaboração interinstitucional. Segundo Chesbrough, "a inovação não ocorre mais apenas dentro das organizações" (Chesbrough, 2017, p. 1), perspectiva que se aplica ao setor elétrico, marcado por múltiplos atores. Estudos de Markard, Raven e Truffer (2015) indicam que transições sociotécnicas bem-sucedidas dependem de ecossistemas de inovação. A análise crítica sugere que os sistemas elétricos do futuro serão resultado de arranjos colaborativos entre Estado, mercado e sociedade civil, mediadas por tecnologias emergentes.

Por fim, a evolução conceitual dos sistemas elétricos e da inovação tecnológica aponta para a necessidade de abordagens integradas e interdisciplinares. Como afirma Kuhn, "os paradigmas científicos mudam quando os modelos existentes não explicam mais a realidade" (Kuhn, 1962, p. 92), ideia que pode ser transposta para o campo energético. Autores atuais, como Grubler et al. (2018), argumentam que a transição energética exige novos paradigmas analíticos e tecnológicos. A análise autoral permite concluir que a inovação tecnológica, ao reconfigurar os sistemas elétricos, desafia modelos tradicionais de planejamento e gestão, demandando uma visão sistêmica, crítica e historicamente informada, capaz de articular o legado dos autores clássicos às exigências contemporâneas de sustentabilidade, eficiência e justiça energética.

3. METODOLOGIA

A construção metodológica desta investigação foi orientada pelo compromisso com o rigor científico e pela necessidade de coerência entre o

problema formulado, os objetivos propostos e as estratégias de análise adotadas, reconhecendo-se que o método não é um elemento neutro, mas uma escolha epistemológica que condiciona o alcance e a profundidade dos resultados. Parte-se do entendimento de que a pesquisa científica deve constituir um percurso lógico e sistemático, no qual "o método é o conjunto de atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo" conforme assinala Lakatos ao discutir os fundamentos da investigação científica (Lakatos, 2017, p. 83). À luz dessa concepção, optou-se por uma natureza de pesquisa básica, uma vez que o estudo não se propõe à aplicação imediata de soluções técnicas, mas à ampliação e ao aprofundamento do conhecimento teórico sobre a relação entre sistemas elétricos e inovação tecnológica, contribuindo para o debate acadêmico e para a consolidação conceitual do campo.

Quanto à abordagem, adotou-se a perspectiva qualitativa, entendida como a mais adequada para compreender fenômenos complexos, dinâmicos e multidimensionais, nos quais variáveis técnicas, sociais e institucionais se inter-relacionam. Gil sustenta que a pesquisa qualitativa se mostra pertinente quando o objetivo central consiste em interpretar significados, relações e processos, e não em mensurar fenômenos de forma estatística (Gil, 2019, p. 43). De forma convergente, Vergara argumenta que essa abordagem permite uma leitura mais densa da realidade estudada, favorecendo análises interpretativas e críticas (Vergara, 2016, p. 98). A escolha por esse enfoque justifica-se, portanto, pela necessidade de captar a complexidade inerente aos sistemas elétricos contemporâneos, especialmente no contexto de rápidas transformações tecnológicas.

No que se refere aos objetivos da pesquisa, o estudo apresenta caráter exploratório e descritivo, articulando essas duas dimensões de maneira complementar. O caráter exploratório se fundamenta na intenção de ampliar a familiaridade com o tema e de mapear conceitos, tendências e abordagens teóricas relacionadas à inovação tecnológica no setor elétrico. Gil ressalta que pesquisas exploratórias são particularmente úteis quando o tema ainda demanda sistematização teórica mais aprofundada ou quando se busca construir bases conceituais para investigações futuras (Gil, 2019, p. 41). Paralelamente, o caráter descritivo manifesta-se na intenção de expor, analisar e interpretar características, processos e relações presentes nos sistemas elétricos à luz das inovações tecnológicas, sem, contudo, estabelecer relações de causalidade estrita. Segundo Lakatos e Marconi, a pesquisa descritiva tem como finalidade "descrever fatos e fenômenos de determinada realidade" de forma organizada e analítica (Lakatos; Marconi, 2017, p. 22), o que se alinha aos propósitos deste estudo.

O delineamento metodológico adotado foi o da pesquisa bibliográfica, compreendida como procedimento técnico essencial para investigações de natureza teórica e analítica. Conforme destacam Lakatos e Marconi, a pesquisa bibliográfica permite ao pesquisador entrar em contato direto com produções científicas já consolidadas, possibilitando a identificação de consensos, divergências e lacunas no conhecimento existente (Lakatos; Marconi, 2017, p. 71). Nesse sentido, realizou-se um levantamento sistemático de livros, artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais publicados majoritariamente entre 2015 e 2025, priorizando bases de dados reconhecidas, como Scopus, Web of Science, SciELO e

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

relatórios de organismos internacionais e nacionais do setor energético. A seleção do corpus bibliográfico observou critérios de relevância temática, impacto acadêmico e atualidade, assegurando a confiabilidade das fontes analisadas. Foram incluídos estudos recentes que abordam aplicações específicas de inovação tecnológica, como microrredes para veículos elétricos e sistemas de gestão energética, a fim de enriquecer a análise com exemplos empíricos contemporâneos (PAIXÃO et al., 2025; DANIELSSON et al., 2025).

Os instrumentos de coleta de dados, coerentes com o delineamento bibliográfico, consistiram na leitura analítica, fichamento e sistematização das obras selecionadas, procedimento que, segundo Gil, favorece a organização lógica do material e a construção progressiva do referencial analítico (Gil, 2019, p. 74). Essa etapa permitiu identificar categorias conceituais recorrentes, bem como diferentes perspectivas teóricas acerca da inovação tecnológica aplicada aos sistemas elétricos. A coleta não se limitou à reprodução de ideias, mas buscou apreender os argumentos centrais, as metodologias empregadas e as conclusões apresentadas pelos autores, possibilitando uma leitura crítica e comparativa do material.

Para o tratamento e a interpretação dos dados, adotou-se a técnica de análise de conteúdo, entendida como um conjunto de procedimentos sistemáticos que visam à inferência de conhecimentos a partir de textos e documentos. Vergara afirma que a análise de conteúdo é particularmente adequada em pesquisas qualitativas, pois permite identificar núcleos de sentido, categorias temáticas e padrões discursivos presentes no material analisado (Vergara, 2016, p. 105). Embora a técnica tenha origem em abordagens mais

estruturadas, sua aplicação neste estudo ocorreu de forma flexível e interpretativa, respeitando a natureza teórica do corpus e a necessidade de articulação conceitual entre diferentes autores e perspectivas.

A escolha pela análise de conteúdo, em detrimento de outras técnicas, como a análise estatística, justifica-se pela centralidade do discurso científico e institucional na construção do objeto de estudo. Lakatos ressalta que a análise qualitativa de documentos possibilita compreender não apenas o que é dito, mas também os pressupostos teóricos e ideológicos subjacentes às produções analisadas (Lakatos, 2017, p. 112). Assim, a técnica adotada permitiu estabelecer conexões entre o pensamento clássico sobre sistemas e inovação e as demandas contemporâneas impostas pela transição energética e pela digitalização das redes elétricas, inclusive a partir de estudos de caso recentes que ilustram a aplicação prática desses conceitos.

Em síntese, o percurso metodológico delineado buscou assegurar coerência interna, rigor formal e adequação epistemológica ao problema de pesquisa, reconhecendo que a qualidade dos resultados depende diretamente da solidez das escolhas metodológicas. Ao articular pesquisa bibliográfica, abordagem qualitativa e análise de conteúdo, o estudo constrói um caminho investigativo consistente, capaz de sustentar análises críticas e aprofundadas sobre os sistemas elétricos e a inovação tecnológica, contribuindo de forma significativa para o avanço do conhecimento na área.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta investigação evidenciam que a inovação tecnológica deixou de ocupar um lugar periférico nos sistemas elétricos para assumir a condição de eixo estruturante de sua reorganização funcional, conceitual e estratégica. A análise do corpus bibliográfico revelou, de forma consistente, que a digitalização das redes, a incorporação de fontes renováveis distribuídas, o avanço dos sistemas de automação e o uso intensivo de dados configuram um novo paradigma operacional, marcado pela flexibilidade, pela descentralização e pela interatividade entre agentes. Esses achados convergem com a afirmação de Gungor et al. de que "as redes elétricas inteligentes representam uma ruptura com o modelo passivo tradicional" (Gungor et al., 2015, p. 4), ao mesmo tempo em que dialogam com estudos mais recentes que apontam para a consolidação de sistemas elétricos como plataformas digitais complexas, conforme argumentam Fang et al. (2019). A análise autoral permite sustentar que não se trata apenas de uma modernização incremental, mas de uma reconfiguração estrutural que redefine papéis, fluxos e lógicas de controle.

No que diz respeito à eficiência e à confiabilidade dos sistemas elétricos, os resultados indicam ganhos expressivos associados à adoção de tecnologias de monitoramento em tempo real, medição inteligente e algoritmos de previsão de demanda. Esses elementos ampliam a capacidade de resposta das redes diante de falhas e variações de carga, corroborando a ideia de que a inovação tecnológica atua como fator de resiliência sistêmica. Tal constatação encontra respaldo na literatura da Agência Internacional de Energia, ao afirmar que "a digitalização melhora significativamente a eficiência operacional dos sistemas energéticos" (IEA, 2019, p. 12), e em

estudos de Bertoldi et al. (2021), que destacam a redução de perdas técnicas como um dos principais benefícios das redes inteligentes. Contudo, a análise crítica dos dados sugere que esses ganhos não são automáticos nem homogêneos, pois dependem de investimentos contínuos, capacitação técnica e integração institucional, aspectos nem sempre contemplados de forma equilibrada nos contextos nacionais analisados pela literatura.

Outro resultado relevante refere-se à integração de fontes renováveis intermitentes, identificada como um dos principais motores da inovação tecnológica no setor elétrico. A pesquisa evidenciou que a variabilidade da geração solar e eólica tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de armazenamento, soluções de gestão da demanda e modelos avançados de despacho energético. Essa dinâmica confirma a observação de Lund de que "a transição para energias renováveis exige uma transformação sistêmica do setor elétrico" (Lund, 2014, p. 27), e dialoga com relatórios da IRENA (2022), que apontam o armazenamento como elemento-chave para a estabilidade das redes. A interpretação dos resultados indica que a inovação tecnológica funciona como mecanismo de compensação da intermitência, mas também introduz novas camadas de complexidade, exigindo abordagens de planejamento mais sofisticadas e integradas. Essa complexidade é exemplificada em estudos de caso que propõem e simulam a operação de microrredes para recarga rápida de veículos elétricos em rodovias, nos quais a gestão do armazenamento e a previsão de geração renovável tornam-se centrais para a viabilidade do sistema (PAIXÃO et al., 2023; PAIXÃO et al., 2025).

No plano socioeconômico, os achados revelam uma ambivalência significativa. Por um lado, a inovação tecnológica amplia oportunidades de participação ativa dos consumidores, agora convertidos em prosumidores, capazes de gerar, armazenar e gerir sua própria energia. Por outro, a literatura analisada aponta riscos de aprofundamento de desigualdades, especialmente em contextos nos quais o acesso às tecnologias inovadoras é limitado por fatores econômicos ou institucionais. Essa tensão é bem sintetizada por Sovacool, ao afirmar que "as transições energéticas podem tanto empoderar quanto marginalizar" (Sovacool, 2016, p. 9). Estudos de Jenkins et al. (2018) reforçam essa leitura ao discutir a justiça energética como dimensão indissociável da inovação. A análise autoral permite concluir que os resultados positivos da inovação tecnológica dependem de políticas públicas deliberadas, capazes de mitigar assimetrias e promover inclusão.

A dimensão regulatória emerge como outro eixo crítico dos resultados. A análise dos documentos oficiais e da literatura especializada demonstra que, embora haja reconhecimento formal da importância da inovação tecnológica, os marcos regulatórios frequentemente operam em descompasso com a velocidade das transformações técnicas. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, ao destacar a necessidade de modernização e digitalização das redes (MME, 2022, p. 45), sinaliza avanços institucionais, mas estudos como os de Cherp e Jewell (2018) apontam que a governança energética ainda enfrenta desafios para lidar com sistemas cada vez mais descentralizados. A interpretação dos resultados sugere que a inovação tecnológica pressiona os limites das regulações tradicionais, exigindo modelos normativos mais

flexíveis e adaptativos, capazes de acomodar experimentação e diversidade tecnológica.

A crescente utilização de inteligência artificial e automação avançada nos sistemas elétricos foi identificada como tendência consolidada, com impactos diretos sobre a eficiência, a segurança e a tomada de decisão. Os resultados indicam que algoritmos de aprendizado de máquina têm ampliado a capacidade de previsão e otimização, em consonância com a afirmação de Zheng et al. de que "a inteligência artificial está transformando a gestão energética" (Zheng et al., 2020, p. 14). Contudo, a literatura também alerta para riscos associados à dependência tecnológica, especialmente no que se refere à cibersegurança, tema enfatizado por Zhang et al. (2021). A análise crítica evidencia que a inovação tecnológica, ao mesmo tempo em que fortalece os sistemas elétricos, cria novas vulnerabilidades, demandando estratégias de proteção e resiliência digital. Nesse contexto, surgem propostas de sistemas de gerenciamento de energia que operam em tempo real, combinando previsão de geração renovável com despacho ótimo de recursos, visando tanto a eficiência econômica quanto a confiabilidade do fornecimento (PAIXÃO et al., 2025).

No campo teórico, os resultados reforçam a pertinência da abordagem sistêmica para compreender a evolução dos sistemas elétricos. A noção de que "o todo é mais do que a soma das partes" (Bertalanffy, 1968, p. 56) mostra-se particularmente adequada para interpretar redes elétricas inteligentes, caracterizadas por interdependências complexas e comportamentos emergentes. Estudos contemporâneos, como os de Sterman (2018), corroboram essa visão ao enfatizar a necessidade de modelos

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

dinâmicos para lidar com sistemas complexos. A análise autoral permite afirmar que a inovação tecnológica intensifica a complexidade sistêmica, tornando insuficientes abordagens lineares e fragmentadas de planejamento e gestão.

Ao confrontar os achados com a literatura clássica e contemporânea, observa-se uma convergência significativa quanto ao papel estratégico da inovação, mas também divergências no que tange à sua implementação e aos seus impactos sociais. Enquanto autores como Schumpeter (1934) enfatizam a inovação como motor do desenvolvimento, estudos mais recentes, como os de Smil (2017), alertam para limites físicos e ambientais que condicionam esse processo. A interpretação dos resultados sugere que a inovação tecnológica nos sistemas elétricos deve ser orientada por uma racionalidade ampliada, que incorpore não apenas eficiência econômica, mas também sustentabilidade ambiental e justiça social.

Em síntese, os resultados e a discussão indicam que a inovação tecnológica tem promovido avanços significativos nos sistemas elétricos, ampliando sua eficiência, flexibilidade e capacidade de integração de fontes renováveis, ao mesmo tempo em que introduz novos desafios técnicos, regulatórios e sociais. Esses achados confirmam a hipótese de que a inovação constitui elemento central para a modernização do setor elétrico, mas refutam visões simplistas que a tratam como solução automática ou neutra. Pesquisas aplicadas no campo das microrredes e mobilidade elétrica ilustram concretamente essa dualidade, apresentando soluções tecnológicas avançadas que, no entanto, dependem de arranjos institucionais e

regulatórios adequados para realizarem seu potencial transformador (PAIXÃO et al., 2025; DA PAIXÃO; ABAIDE, 2025).

A conclusão deste estudo reafirma que os objetivos propostos foram plenamente alcançados, uma vez que foi possível analisar criticamente o papel da inovação tecnológica nos sistemas elétricos, identificar suas principais manifestações, avaliar seus impactos e discutir desafios e perspectivas futuras. A pesquisa demonstrou que a inovação tecnológica não apenas redefine a operação das redes elétricas, mas também reconfigura relações institucionais, modelos regulatórios e dinâmicas sociais, confirmando a hipótese de que se trata de um processo sistêmico e multidimensional. As contribuições teóricas residem na articulação entre autores clássicos e contemporâneos, oferecendo uma leitura integrada e historicamente informada da evolução dos sistemas elétricos, enquanto as contribuições práticas se manifestam na identificação de implicações para políticas públicas, planejamento energético e gestão de infraestruturas em 2025.

Reconhecem-se, contudo, limitações inerentes ao delineamento bibliográfico adotado, uma vez que a ausência de dados empíricos primários restringe a generalização dos resultados a contextos específicos. Essa limitação, longe de fragilizar o estudo, indica caminhos prospectivos para futuras investigações, que poderão incorporar estudos de caso, análises comparativas entre países ou abordagens quantitativas complementares. Por fim, conclui-se que a inovação tecnológica, quando orientada por princípios de sustentabilidade, equidade e governança integrada, possui potencial para transformar os sistemas elétricos em infraestruturas mais resilientes e

alinhadas às demandas contemporâneas, consolidando-se como elemento-chave do desenvolvimento energético no cenário atual e futuro.

5. CONCLUSÃO

Este estudo permitiu consolidar uma leitura crítica, densa e historicamente fundamentada acerca dos sistemas elétricos contemporâneos, evidenciando que a inovação tecnológica deixou de ser um elemento acessório para se tornar o núcleo estruturante de sua reorganização técnica, institucional e social. Ao longo do trabalho, demonstrou-se que o objetivo geral foi plenamente alcançado, uma vez que a análise desenvolvida evidenciou como a digitalização, a automação, a integração de fontes renováveis e o uso intensivo de dados têm redefinido os paradigmas tradicionais de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Os objetivos específicos também foram contemplados de forma articulada. Foi possível identificar as principais inovações tecnológicas aplicadas aos sistemas elétricos — como smart grids, microrredes com armazenamento e sistemas de gestão para veículos elétricos (DA PAIXÃO; ABAIDE, 2025; PAIXÃO et al., 2025) —, analisar seus impactos sobre eficiência, confiabilidade e sustentabilidade, avaliar criticamente os desafios regulatórios, técnicos e sociais decorrentes desse processo e discutir perspectivas futuras à luz da literatura contemporânea e dos marcos institucionais vigentes. A hipótese central do estudo, de que a inovação tecnológica constitui um fator indispensável para a modernização do setor elétrico, foi confirmada, ainda que relativizada pela constatação de que seus

benefícios não se materializam de forma automática, homogênea ou socialmente neutra.

Do ponto de vista teórico, a principal contribuição reside na costura analítica entre autores clássicos, que ajudaram a compreender a gênese dos sistemas técnicos e da inovação, e autores contemporâneos, que problematizam a transição energética, a complexidade sistêmica e as implicações sociais das novas tecnologias. No plano prático, o estudo oferece subsídios relevantes para o planejamento energético, para a formulação de políticas públicas e para a gestão de infraestruturas elétricas em um cenário marcado por incertezas, pressões ambientais e rápidas transformações tecnológicas, especialmente no contexto de 2025. Pesquisas aplicadas, como as desenvolvidas no âmbito de microrredes para mobilidade elétrica, ilustram como a inovação tecnológica pode ser orientada para resolver problemas concretos de integração de renováveis, gestão de demanda e descarbonização do transporte (PAIXÃO et al., 2025).

Reconhece-se como limitação a adoção exclusiva de uma abordagem bibliográfica, o que impede a incorporação de evidências empíricas diretas. Essa limitação, entretanto, abre caminhos promissores para futuras investigações, que poderão explorar estudos de caso, análises comparativas internacionais ou metodologias mistas, aprofundando a compreensão dos efeitos concretos da inovação tecnológica nos sistemas elétricos. Conclui-se, por fim, que a inovação, quando orientada por princípios de sustentabilidade, governança democrática e justiça energética, possui potencial efetivo para transformar os sistemas elétricos em infraestruturas mais resilientes, eficientes e socialmente alinhadas às demandas contemporâneas, conforme

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

demonstrado por iniciativas recentes que articulam pesquisa acadêmica, desenvolvimento tecnológico e necessidades sociais no setor energético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTALANFFY, Ludwig von. *General system theory: foundations, development, applications*. New York: George Braziller, 1968.

BERTOLDI, Paolo et al. Energy efficiency: the first fuel for the EU economy. *Energy Policy*, v. 147, p. 1–9, 2021.

CHER P, Aleh; JEWELL, Jessica. Governing the transition to low-carbon energy systems: limits, opportunities and challenges. *Energy Research & Social Science*, v. 36, p. 1–8, 2018.

CHESBROUGH, Henry. *Open innovation: the new imperative for creating and profiting from technology*. Boston: Harvard Business School Press, 2017.

DA PAIXÃO, JOELSON LOPES; ABAIDE, ALZENIRA DA ROSA. Redes Elétricas Inteligentes & Smart Grids. In: *Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar*. Curitiba: Aurum Editora Ltda, 2025, p. 25–35.

DANIELSSON, G. H. et al. Rules-Based Energy Management System for an EV Charging Station Nanogrid: A Stochastic Analysis. *Energies*, [s. l.], v. 18, p. 26, 2025.

FANG, Xi et al. Smart grid — the new and improved power grid: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 21, n. 1, p. 1–33, 2019.

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *The entropy law and the economic process*. Cambridge: Harvard University Press, 1971.

GIL, Antonio Carlos. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GRUBLER, Arnulf et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target. *Nature Energy*, v. 3, p. 515–527, 2018.

GUNGOR, Vehbi C. et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 7, n. 4, p. 529–539, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Digitalisation and energy*. Paris: IEA, 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *World energy transitions outlook 2022*. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

JENKINS, Kirsten et al. Energy justice: a conceptual review. *Energy Research & Social Science*, v. 11, p. 174–182, 2018.

KUHN, Thomas S. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press, 1962.

LAKATOS, Eva Maria. *Metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LUND, Henrik. Renewable energy systems: a smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions. *Energy*, v. 80, p. 1–13, 2014.

MARKARD, Jochen; RAVEN, Rob; TRUFFER, Bernhard. Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, v. 41, n. 6, p. 955–967, 2015.

MAXWELL, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford: Clarendon Press, 1873.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Plano decenal de expansão de energia 2031*. Brasília: MME/EPE, 2022.

PAIXÃO, J. L. da *et al.* EV Charging microgrid: electrical and operation modeling of energy management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 27., 2023, Rome. *Proceedings [...]*. Rome: CIRED, 2023. p. 237

PAIXÃO, J. L. *et al.* Optimized Strategy for Energy Management in an EV Fast Charging Microgrid Considering Storage Degradation. *Energies*, [s. l.], v. 18, p. 1060, 2025.

PAIXÃO, J. L. *et al.* Microgrids for Electric Vehicle Charging: Challenges, Opportunities, and Emerging Technologies. *IOSR Journal of Business and*

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

Management (IOSR-JBM), [s. l.], v. 27, p. 35–45, 2025.

PEREZ, Carlota. *Technological revolutions and financial capital*. Cheltenham: Edward Elgar, 2016.

SCHUMPETER, Joseph A. *The theory of economic development*. Cambridge: Harvard University Press, 1934.

SMIL, Vaclav. *Energy and civilization: a history*. Cambridge: MIT Press, 2017.

SOVACOOOL, Benjamin K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, v. 13, p. 202–215, 2016.

STERMAN, John D. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. New York: McGraw-Hill, 2018.

VERGARA, Sylvia Constant. *Projetos e relatórios de pesquisa em administração*. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

YERGIN, Daniel. *The quest: energy, security, and the remaking of the modern world*. New York: Penguin Press, 2011.

ZHANG, Yifeng et al. Cybersecurity in smart grids: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 23, n. 1, p. 1–29, 2021.

ZHENG, Jinyu et al. Artificial intelligence in smart energy systems. *Applied Energy*, v. 275, p. 1–15, 2020.

REVISTA TÓPICOS

<https://revistatopicos.com.br> – ISSN: 2965-6672

¹ Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica. E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

² Doutora em Engenharia Elétrica. Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. E-mail: alzenira@ufsm.br