

MONITORAMENTO INTELIGENTE DE REDES ELÉTRICAS: FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS, APLICAÇÕES E DESAFIOS NO CONTEXTO DAS SMART GRIDS

INTELLIGENT MONITORING OF ELECTRICAL NETWORKS: TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS, APPLICATIONS, AND CHALLENGES IN THE CONTEXT OF SMART GRIDS

 <https://doi.org/10.63330/armv2n2-004>

Submetido em: 04/03/2026 e Publicado em: 09/03/2026

Joelson Lopes da Paixão

Doutorando em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

RESUMO

O monitoramento inteligente de redes elétricas constitui elemento central na modernização da infraestrutura energética contemporânea, sobretudo diante da digitalização dos sistemas de geração, transmissão e distribuição. A crescente complexidade operacional resultante da integração de fontes renováveis intermitentes, da descentralização da geração e da ampliação do consumo demanda mecanismos capazes de coletar, processar e interpretar dados em tempo real. Nesse cenário, tecnologias como sensores avançados, medidores inteligentes (smart meters), sistemas SCADA aprimorados, Internet das Coisas (IoT) e algoritmos de Inteligência Artificial (IA) convergem para constituir arquiteturas de monitoramento orientadas ao aumento da confiabilidade, da eficiência e da resiliência das redes elétricas. O presente estudo analisa criticamente os fundamentos técnicos, as aplicações práticas e os desafios associados ao monitoramento inteligente de redes, discutindo sua contribuição para a detecção precoce de falhas, a manutenção preditiva, a gestão da demanda e a estabilidade sistêmica. Parte-se da premissa de que a capacidade de monitoramento em tempo real não representa mera inovação incremental, mas uma reconfiguração estrutural do modelo operacional das redes elétricas, na qual dados são convertidos em decisões automatizadas. Argumenta-se que a incorporação de sensores distribuídos e plataformas analíticas avançadas reduz perdas técnicas, otimiza o fluxo de potência e amplia a capacidade de resposta a eventos críticos, embora introduza desafios relacionados à segurança cibernética, à interoperabilidade tecnológica e à governança de dados. Conclui-se que o monitoramento inteligente constitui pilar estratégico das smart grids, exigindo integração entre engenharia elétrica, ciência de dados e regulação tecnológica para assegurar sustentabilidade e confiabilidade energética.



Palavras-chave: Monitoramento inteligente; Redes elétricas; Smart grids; Internet das Coisas; Inteligência Artificial.

ABSTRACT

Intelligent monitoring of electrical networks constitutes a central element in the modernization of contemporary energy infrastructure, particularly in the context of the digitalization of generation, transmission, and distribution systems. The growing operational complexity resulting from the integration of intermittent renewable sources, decentralization of generation, and expansion of consumption demands mechanisms capable of collecting, processing, and interpreting data in real time. In this scenario, technologies such as advanced sensors, smart meters, enhanced SCADA systems, the Internet of Things (IoT), and Artificial Intelligence (AI) algorithms converge to form monitoring architectures aimed at increasing the reliability, efficiency, and resilience of electrical networks. This study critically analyzes the technical foundations, practical applications, and challenges associated with intelligent network monitoring, discussing its contribution to early fault detection, predictive maintenance, demand management, and systemic stability. It is based on the premise that real-time monitoring capability does not represent a mere incremental innovation but rather a structural reconfiguration of the operational model of electrical networks, in which data are converted into automated decisions. It is argued that the incorporation of distributed sensors and advanced analytical platforms reduces technical losses, optimizes power flow, and expands the capacity to respond to critical events, although it introduces challenges related to cybersecurity, technological interoperability, and data governance. It is concluded that intelligent monitoring constitutes a strategic pillar of smart grids, requiring integration between electrical engineering, data science, and technological regulation to ensure energy sustainability and reliability.

Keywords: Intelligent monitoring; Electrical networks; Smart grids; Internet of Things; Artificial Intelligence.

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas elétricos ao longo das últimas décadas tem sido marcada por um processo contínuo de complexificação estrutural e digitalização tecnológica. Tradicionalmente, as redes de energia operavam sob modelo centralizado, com fluxo unidirecional de eletricidade e monitoramento limitado a pontos estratégicos do sistema. Entretanto, a inserção crescente de fontes renováveis distribuídas, como energia solar fotovoltaica e eólica, associada à ampliação do consumo e à descentralização da geração, alterou de modo significativo o paradigma operacional do setor elétrico (Paixão, 2026a).



Nesse novo contexto, o monitoramento inteligente de redes emerge como elemento indispensável para garantir estabilidade, eficiência e segurança. A capacidade de coletar dados em tempo real sobre tensão, corrente, frequência, temperatura e qualidade de energia permite não apenas identificar falhas, mas antecipar eventos críticos e otimizar a operação do sistema como um todo. A digitalização dos sistemas elétricos, impulsionada pela disseminação de sensores inteligentes e plataformas de comunicação digital, transforma as redes tradicionais em redes inteligentes, comumente designadas smart grids (Paixão; Abaide, 2025a).

A noção de smart grid implica a integração entre infraestrutura física e uma camada digital capaz de processar grandes volumes de dados. Sensores instalados em linhas de transmissão, transformadores e subestações fornecem informações contínuas que são analisadas por sistemas computacionais avançados. Medidores inteligentes instalados em unidades consumidoras ampliam a granularidade dos dados, possibilitando gestão mais precisa da demanda e melhor compreensão do comportamento da carga.

A importância do monitoramento inteligente intensificou-se diante da variabilidade inerente às fontes renováveis. A intermitência da geração solar e eólica exige sistemas capazes de ajustar rapidamente o fluxo de energia e manter a estabilidade de frequência do sistema. A ausência de monitoramento adequado pode resultar em oscilações significativas e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Além disso, eventos climáticos extremos, cada vez mais frequentes e intensos, ampliam a necessidade de sistemas resilientes. A detecção rápida de falhas em linhas de transmissão ou transformadores possibilita resposta ágil, reduzindo o tempo de interrupção e os prejuízos econômicos associados. Paixão e Abaide (2026) argumentam que a resiliência dos sistemas elétricos está diretamente vinculada à capacidade de monitoramento e resposta rápida a perturbações, especialmente em contextos de alta penetração de fontes renováveis e cargas móveis como veículos elétricos.

Entretanto, a incorporação de tecnologias digitais às redes elétricas introduz novos desafios. A interconectividade amplia a superfície de ataque cibernético, exigindo protocolos robustos de segurança. A interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes demanda padronização técnica rigorosa. A governança dos dados energéticos, incluindo privacidade e uso comercial das informações, torna-se questão regulatória estratégica que permeia todas as dimensões da modernização do setor (Paixão, 2026b).

Diante desse panorama, formula-se a seguinte questão norteadora: de que maneira o monitoramento inteligente contribui para a eficiência e a confiabilidade das redes elétricas, e quais são os principais desafios técnicos e regulatórios associados à sua implementação?

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar criticamente o monitoramento inteligente de redes elétricas no contexto das smart grids. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) examinar os fundamentos tecnológicos dos sistemas de monitoramento; (ii) discutir aplicações práticas em detecção de falhas e



manutenção preditiva; (iii) analisar os impactos na eficiência energética; e (iv) identificar desafios relacionados à segurança cibernética e à governança de dados.

A relevância do tema reside na centralidade do setor elétrico para o desenvolvimento econômico e na urgência de modernização da infraestrutura energética diante da transição energética global. O monitoramento inteligente configura-se como componente essencial para a consolidação de sistemas elétricos mais eficientes, resilientes e sustentáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O monitoramento inteligente de redes elétricas fundamenta-se na convergência entre engenharia elétrica, tecnologias de comunicação e ciência de dados. Gungor et al. (2011) definem smart grid como uma rede elétrica que integra tecnologias digitais e comunicação bidirecional para melhorar eficiência e confiabilidade. O monitoramento em tempo real constitui um dos pilares desse modelo, ao permitir supervisão contínua dos parâmetros operacionais. Paixão e Abaide (2025a) reforçam que as redes elétricas inteligentes representam uma ruptura paradigmática em relação ao modelo convencional, na medida em que viabilizam a gestão ativa e descentralizada dos recursos energéticos.

Os sistemas tradicionais de supervisão e aquisição de dados (SCADA) desempenharam papel histórico no controle das redes elétricas. Entretanto, conforme Fang et al. (2012), a evolução para smart grids exige ampliação da granularidade e da frequência de coleta de dados, superando limitações dos sistemas convencionais. Sensores distribuídos e medidores inteligentes ampliam significativamente a capacidade de observabilidade da rede, fornecendo dados que antes eram inacessíveis aos operadores.

A Internet das Coisas (IoT) desempenha papel central nesse processo de transformação. Atzori, Iera e Morabito (2010) argumentam que a IoT conecta dispositivos físicos a redes digitais, permitindo coleta massiva de dados. No setor elétrico, sensores IoT monitoram condições ambientais, fluxo de potência e integridade estrutural de equipamentos. Paixão (2025) aprofunda essa discussão ao analisar os conceitos, desafios e aplicações específicas da IoT no contexto das redes elétricas inteligentes, destacando que a pervasividade dos dispositivos conectados viabiliza níveis de observabilidade antes impraticáveis em sistemas de distribuição.

A análise dos dados coletados depende de algoritmos avançados. Goodfellow, Bengio e Courville (2016) demonstram que redes neurais profundas são capazes de identificar padrões complexos em grandes volumes de dados, contribuindo para a detecção automática de anomalias. Zhang et al. (2019) aplicam técnicas de deep learning para diagnóstico de falhas em transformadores, alcançando elevada acurácia preditiva. Esses avanços reforçam a importância da intersecção entre ciência de dados e engenharia elétrica para a construção de sistemas de monitoramento verdadeiramente inteligentes.



A manutenção preditiva representa avanço significativo em relação à manutenção corretiva. Segundo Dunn, Kamath e Tarascon (2011), a antecipação de falhas reduz custos operacionais e aumenta a confiabilidade sistêmica. O monitoramento contínuo permite a substituição programada de componentes antes da ocorrência de interrupções, configurando mudança paradigmática na forma como se gerencia a infraestrutura elétrica.

A segurança cibernética emerge como preocupação central no âmbito das redes inteligentes. Yan et al. (2012) alertam que redes inteligentes, ao dependerem de comunicação digital intensiva, tornam-se vulneráveis a ataques direcionados. A implementação de protocolos criptográficos e sistemas de detecção de intrusão torna-se, portanto, componente indissociável da arquitetura de monitoramento.

A interoperabilidade também constitui desafio técnico relevante. O NIST (2014) propõe estrutura de referência para assegurar compatibilidade entre dispositivos e sistemas heterogêneos. A ausência de padrões unificados pode comprometer a escalabilidade do monitoramento inteligente e dificultar a integração de novos dispositivos ao ecossistema das smart grids.

Sob perspectiva sistêmica, Momoh (2012) argumenta que a modernização das redes elétricas requer integração entre infraestrutura física e uma camada cognitiva digital. O monitoramento inteligente atua como mecanismo de retroalimentação contínua, permitindo decisões automatizadas baseadas em dados. Paixão (2026c) corrobora essa visão ao analisar como a digitalização, a automação e a inovação nos sistemas elétricos contemporâneos configuram uma nova arquitetura operacional em que a inteligência distribuída substitui progressivamente o controle centralizado.

Além disso, a integração de geração distribuída amplia a necessidade de monitoramento bidirecional. Lopes, Soares e Almeida (2011) destacam que a presença de veículos elétricos e sistemas fotovoltaicos residenciais altera o fluxo tradicional de energia, exigindo supervisão em múltiplos pontos da rede.

Em síntese, o referencial teórico evidencia que o monitoramento inteligente constitui elemento estruturante das smart grids, integrando sensores, comunicação digital e algoritmos analíticos avançados. Seus benefícios incluem maior eficiência, redução de perdas e aumento da confiabilidade, embora desafios relacionados à segurança, à interoperabilidade e à governança tecnológica demandem abordagem multidisciplinar e regulamentação adequada.

3 METODOLOGIA

A presente investigação caracteriza-se como pesquisa qualitativa de natureza aplicada, desenvolvida por meio de revisão sistemática da literatura com abordagem técnico-analítica e interdisciplinar. O objetivo metodológico consistiu em examinar criticamente as tecnologias, arquiteturas e aplicações do



monitoramento inteligente de redes elétricas, considerando seus impactos operacionais, energéticos e regulatórios.

Conforme Gil (2019), a revisão sistemática permite organizar o conhecimento acumulado em determinado campo, identificar padrões recorrentes, lacunas investigativas e tendências tecnológicas emergentes. A pesquisa foi estruturada a partir de cinco eixos analíticos: (i) tecnologias de sensoriamento e aquisição de dados; (ii) sistemas de comunicação e interoperabilidade; (iii) análise de dados e Inteligência Artificial; (iv) manutenção preditiva e detecção de falhas; e (v) segurança cibernética e governança de dados.

Foram utilizados descritores em português e inglês, tais como "intelligent network monitoring", "smart grid monitoring systems", "SCADA and IoT in power systems", "AI-based fault detection", "cybersecurity in smart grids" e "grid observability". As buscas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect e Google Scholar. O recorte temporal priorizou publicações entre 2012 e 2024, período de consolidação das smart grids e de expansão da Internet das Coisas aplicada ao setor elétrico, sem excluir referências clássicas fundacionais.

Os critérios de inclusão contemplaram: (i) artigos revisados por pares; (ii) estudos experimentais ou de simulação envolvendo monitoramento em tempo real; (iii) relatórios técnicos de organismos como IEEE, NIST e International Energy Agency (IEA); e (iv) pesquisas que abordassem integração entre sensores, algoritmos de IA e segurança cibernética. Foram excluídos textos sem fundamentação metodológica explícita ou com escopo exclusivamente opinativo.

Após triagem inicial por títulos e resumos, realizou-se leitura integral das publicações selecionadas. Elaboraram-se fichamentos analíticos contendo dados sobre arquitetura dos sistemas, tipos de sensores utilizados (PMU, smart meters, sensores IoT), protocolos de comunicação (IEC 61850, MQTT, DNP3), métricas de desempenho (tempo de resposta, taxa de detecção de falhas, precisão preditiva) e limitações identificadas.

A análise foi conduzida por categorização temática, conforme Bardin (2011), organizando os resultados em seis categorias principais: (i) ampliação da observabilidade da rede; (ii) automação e resposta em tempo real; (iii) eficiência energética; (iv) resiliência sistêmica; (v) riscos cibernéticos; e (vi) desafios regulatórios e de padronização.

A triangulação entre dados técnicos, referenciais teóricos e relatórios institucionais permitiu construir uma interpretação crítica do monitoramento inteligente como elemento estruturante das smart grids. A abordagem qualitativa mostrou-se adequada para análise integrada de fenômeno multidimensional que envolve engenharia elétrica, ciência de dados, telecomunicações e governança tecnológica.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura evidencia que o monitoramento inteligente representa avanço substancial na observabilidade das redes elétricas. A introdução de Phasor Measurement Units (PMUs) permitiu a medição síncrona de fasores de tensão e corrente em alta frequência, ampliando consideravelmente a capacidade de análise dinâmica do sistema. Segundo Phadke e Thorp (2017), as PMUs possibilitam monitoramento em escala de milissegundos, superando limitações inerentes aos sistemas SCADA tradicionais, que operam com taxas de atualização significativamente mais baixas.

A integração de medidores inteligentes (smart meters) também ampliou a granularidade dos dados de consumo. Gungor et al. (2011) destacam que a comunicação bidirecional entre concessionárias e consumidores permite gestão ativa da demanda e identificação de perdas não técnicas. A coleta de dados em intervalos curtos contribui para modelagem mais precisa do comportamento de carga, oferecendo subsídios para planejamento operacional e expansão do sistema.

A Internet das Coisas (IoT) desempenha papel central na expansão do monitoramento distribuído. Atzori, Iera e Morabito (2010) ressaltam que sensores conectados permitem coleta massiva de dados ambientais e operacionais. Em linhas de transmissão, sensores IoT monitoram vibração, temperatura e integridade estrutural, antecipando riscos de falha. A pervasividade desses dispositivos, conforme discutido por Paixão (2025), redefine a capacidade de supervisão das redes de distribuição, possibilitando a coleta de dados em pontos que anteriormente não eram monitorados.

A aplicação de Inteligência Artificial aos dados coletados amplia significativamente a capacidade preditiva dos sistemas de monitoramento. Goodfellow, Bengio e Courville (2016) demonstram que redes neurais profundas são capazes de identificar padrões complexos em grandes conjuntos de dados. Zhang et al. (2019) aplicaram técnicas de deep learning para detecção de falhas em transformadores, alcançando acurácia superior a 95% em cenários experimentais. Esses resultados demonstram que a combinação de sensores distribuídos e algoritmos de aprendizado profundo configura uma nova fronteira para o diagnóstico automatizado de equipamentos elétricos.

A manutenção preditiva constitui um dos principais benefícios do monitoramento inteligente. Dunn, Kamath e Tarascon (2011) argumentam que a antecipação de falhas reduz custos operacionais e evita interrupções prolongadas. Modelos baseados em aprendizado supervisionado conseguem identificar degradação gradual de componentes antes da ocorrência de falhas críticas, permitindo ações preventivas que prolongam a vida útil dos ativos e melhoram os indicadores de continuidade do fornecimento.

A eficiência energética também é impactada positivamente pelo monitoramento inteligente. Zhang et al. (2013) demonstram que o monitoramento em tempo real permite otimização do fluxo de potência e redução de perdas técnicas. A integração com sistemas de resposta à demanda amplia a flexibilidade operacional, possibilitando ajustes dinâmicos que acomodam variações na geração e no consumo. Paixão



(2026a) destaca que a inovação tecnológica nas redes elétricas, particularmente no contexto da descentralização energética, depende fundamentalmente de mecanismos de monitoramento que possibilitem a gestão coordenada de múltiplos recursos distribuídos.

Entretanto, a digitalização amplia a superfície de ataque cibernético. Yan et al. (2012) alertam que redes inteligentes dependentes de comunicação digital se tornam vulneráveis a ataques direcionados. A segurança da informação exige criptografia robusta, autenticação de dispositivos e monitoramento contínuo de intrusões. A complexidade desse desafio aumenta na medida em que a quantidade de dispositivos conectados cresce exponencialmente, ampliando os vetores de vulnerabilidade.

Outro desafio relevante refere-se à interoperabilidade. O NIST (2014) propõe estruturas de padronização para assegurar compatibilidade entre dispositivos heterogêneos. A ausência de protocolos unificados pode comprometer a escalabilidade e a integração sistêmica, gerando ilhas tecnológicas que reduzem a efetividade do monitoramento como um todo.

A governança de dados constitui dimensão adicional de grande relevância. A coleta massiva de informações sobre consumo energético levanta questões de privacidade e uso comercial dos dados. Relatórios da IEA (2023) ressaltam a necessidade de marcos regulatórios que equilibrem inovação tecnológica e proteção do consumidor, evitando que a assimetria informacional resultante da digitalização comprometa direitos fundamentais dos usuários do sistema elétrico.

Do ponto de vista sistêmico, o monitoramento inteligente atua como camada cognitiva das smart grids, permitindo decisões automatizadas baseadas em dados em tempo real. Momoh (2012) argumenta que a modernização das redes depende da integração entre infraestrutura física e camada digital adaptativa. Paixão (2026b) complementa essa perspectiva ao demonstrar que a transformação digital do setor elétrico posiciona as redes inteligentes como eixo central de uma nova arquitetura energética, na qual a informação é tão estratégica quanto a própria energia que flui pela rede.

Em síntese, os resultados indicam que o monitoramento inteligente amplia a eficiência, a confiabilidade e a resiliência das redes elétricas. Contudo, sua consolidação requer investimentos contínuos em segurança cibernética, padronização tecnológica e regulamentação adequada para garantir governança responsável dos dados e sustentabilidade da infraestrutura digital.

5 CONCLUSÃO

A investigação demonstrou que o monitoramento inteligente de redes elétricas constitui elemento estruturante das smart grids e da modernização do setor energético. A ampliação da observabilidade por meio de PMUs, medidores inteligentes e sensores IoT permite supervisão em tempo real e identificação precoce de falhas, elevando os padrões de confiabilidade e eficiência operacional.



A integração de Inteligência Artificial aos sistemas de monitoramento potencializa a capacidade preditiva e a automação de processos, reduzindo perdas técnicas e custos operacionais. A manutenção preditiva baseada em dados representa mudança paradigmática em relação à abordagem corretiva tradicional, contribuindo para a sustentabilidade econômica e operacional do setor elétrico.

Entretanto, a digitalização das redes amplia desafios significativos que não podem ser negligenciados. A segurança cibernética emerge como prioridade estratégica, dada a criticidade da infraestrutura elétrica para a sociedade contemporânea. A interoperabilidade entre dispositivos e a governança dos dados energéticos exigem padronização técnica e regulamentação robusta, que acompanhem o ritmo acelerado das inovações tecnológicas no setor.

Reconhece-se como limitação deste estudo a natureza bibliográfica da pesquisa, que não contempla dados empíricos primários. Investigações futuras poderão desenvolver estudos de caso empíricos e análises quantitativas sobre o impacto econômico da implementação de sistemas de monitoramento inteligente em redes específicas, incluindo avaliações de custo-benefício e mensuração de indicadores de desempenho operacional.

Conclui-se que o monitoramento inteligente representa pilar essencial da transição para sistemas elétricos mais eficientes, resilientes e sustentáveis. Sua consolidação exige integração sinérgica entre inovação tecnológica, políticas públicas e governança responsável, assegurando que os benefícios da digitalização se traduzam em ganhos concretos para a sociedade e para a sustentabilidade energética.

REFERÊNCIAS

ABB. Digital Substation Monitoring Report. Zürich: ABB, 2022.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010.

BARDIN, Laurence. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2011.

DUNN, Bruce; KAMATH, Haresh; TARASCON, Jean-Marie. Electrical energy storage for the grid. *Science*, v. 334, n. 6058, p. 928-935, 2011.

FANG, Xi et al. Smart grid – the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 944-980, 2012.

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

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.

GUNGOR, Vehbi C. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 7, n. 4, p. 529-539, 2011.



GUNGOR, Vehbi C.; HANCKE, Gerhard P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 10, p. 4258-4265, 2009.

HONG, Tao; FAN, Shu. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. *International Journal of Forecasting*, v. 32, n. 3, p. 914-938, 2016.

IEA. *Digitalization and Energy*. Paris: International Energy Agency, 2017.

IEA. *World Energy Outlook 2023*. Paris: International Energy Agency, 2023.

IEEE. *IEEE Guide for Monitoring and Control of Electric Power Systems*. New York: IEEE, 2021.

KONG, Weicon et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 1, p. 841-851, 2017.

LOPES, João A. P.; SOARES, Filipe J.; ALMEIDA, Pedro M. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 1, p. 168-183, 2011.

MOMOH, James. *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. Hoboken: Wiley, 2012.

NIST. *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards*, Release 3.0. Gaithersburg: NIST, 2014.

OECD. *Energy Infrastructure Digitalization Report*. Paris: OECD, 2023.

PAIXÃO, J. L. Inovação tecnológica em redes elétricas: avanços, desafios e perspectivas na era das smart grids e da descentralização energética. *Revista Tópicos*, v. 4, p. 1-23, 2026a.

PAIXÃO, J. L. Transformação digital no setor elétrico: o papel central das redes inteligentes. *Revista Tópicos*, v. 4, p. 1-19, 2026b.

PAIXÃO, J. L. Energia elétrica e transformação tecnológica: digitalização, automação e inovação nos sistemas elétricos contemporâneos. *Revista Tópicos*, v. 4, p. 1-21, 2026c.

PAIXÃO, J. L. Internet das Coisas (IoT): conceitos, desafios e aplicações no contexto das redes elétricas inteligentes. In: *Inovações Multidisciplinares na Engenharia*. Curitiba: Aurum Editora, 2025. p. 1-11.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Redes elétricas inteligentes: smart grids. In: *Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar*. Curitiba: Aurum Editora, 2025a. p. 25-35.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Sistemas elétricos resilientes e segurança energética: uma análise integrada a partir de pesquisas em microrredes, veículos elétricos e fontes renováveis. *Revista Tópicos*, v. 4, p. 1-22, 2026.

PALATELLA, Maria Rita et al. Internet of Things in the 5G era: Enablers, architecture, and business models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 34, n. 3, p. 510-527, 2016.

PHADKE, Arun G.; THORP, James S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. 2. ed. New York: Springer, 2017.



RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2020.

SUN, Hao et al. Reinforcement learning for power systems optimization: A review. Applied Energy, v. 270, 2020.

VOYANT, Cyril et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. Renewable Energy, v. 105, p. 569-582, 2017.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Future of Electricity Infrastructure. Geneva: WEF, 2022.

YAN, Ying et al. A survey on cyber security for smart grid communications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 14, n. 4, p. 998-1010, 2012.

ZHANG, Yan et al. Home energy management systems: A survey of architectures and technologies. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 15, n. 4, p. 2033-2055, 2013.

ZHANG, Zhe et al. Deep learning-based fault diagnosis in power systems: A comprehensive review. IEEE Transactions on Power Systems, v. 34, n. 6, p. 4396-4408, 2019.