

INTEGRAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM ESTABELECIMENTOS COMERCIAIS VISANDO SUSTENTABILIDADE URBANA

Harley Ferreira de Moraes
Paulo Sérgio Pádua de Lacerda

RESUMO

Este trabalho investiga o papel da inteligência artificial (IA) na otimização do consumo de energia em estabelecimentos comerciais, com foco na contribuição para a sustentabilidade urbana. O crescimento populacional, a verticalização das cidades e a intensificação das atividades comerciais aumentam significativamente a demanda por energia elétrica, tornando imperativa a adoção de práticas inovadoras para o uso eficiente dos recursos energéticos. A pesquisa fundamenta-se na integração entre tecnologias digitais, automação e redes neurais para propor soluções que aliem eficiência energética, redução de custos e responsabilidade ambiental. O estudo discute inicialmente os desafios da sustentabilidade urbana, ressaltando como o consumo energético desordenado em áreas urbanas densas pressiona os sistemas de geração e distribuição, comprometendo a resiliência das cidades. Em seguida, é explorado o potencial da IA como ferramenta de transformação digital no setor energético, destacando sua aplicação em técnicas de previsão de carga, diagnóstico de falhas e controle inteligente de sistemas prediais. A utilização de redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e aprendizado de máquina permite identificar padrões de consumo, antecipar demandas e automatizar decisões de ajuste, promovendo maior eficiência operacional e reduzindo o impacto ambiental. O trabalho aprofunda-se na previsão de carga elétrica como mecanismo de apoio à gestão energética em estabelecimentos comerciais, permitindo não apenas um controle mais preciso sobre o consumo, mas também a participação ativa em programas de resposta à demanda. Além disso, discute-se a aplicação de tecnologias como IoT e dashboards de gestão energética que, integrados à IA, permitem visualização em tempo real, manutenção preditiva e automação de rotinas operacionais. A pesquisa também analisa a importância das cidades inteligentes e das infraestruturas energéticas conectadas, demonstrando que a conectividade entre redes elétricas, sensores e plataformas digitais é essencial para uma gestão urbana sustentável. Nesse contexto, os estabelecimentos comerciais deixam de ser apenas consumidores passivos e passam a atuar como agentes ativos, contribuindo para a estabilidade do sistema por meio de geração distribuída e compartilhamento de dados. Por fim, o estudo apresenta considerações sobre os desafios e as oportunidades na implementação dessas tecnologias, destacando a necessidade de formação de profissionais capacitados, políticas públicas adequadas e governança integrada. Conclui-se que a integração entre inteligência artificial e gestão energética representa um avanço crucial para o desenvolvimento de cidades mais inteligentes, eficientes e ambientalmente responsáveis. Essa abordagem não apenas fortalece a

infraestrutura urbana, mas também promove inclusão social, inovação tecnológica e redução das emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Sustentabilidade Urbana; Gestão Energética.

ABSTRACT

This study investigates the role of artificial intelligence (AI) in optimizing energy consumption in commercial establishments, with a focus on contributing to urban sustainability. Population growth, urban verticalization, and the intensification of commercial activities significantly increase the demand for electricity, making it imperative to adopt innovative practices for the efficient use of energy resources. The research is based on the integration of digital technologies, automation, and neural networks to propose solutions that combine energy efficiency, cost reduction, and environmental responsibility. The study initially discusses the challenges of urban sustainability, highlighting how disorderly energy consumption in dense urban areas puts pressure on generation and distribution systems, compromising the resilience of cities. Next, it explores the potential of AI as a tool for digital transformation in the energy sector, highlighting its application in load forecasting techniques, fault diagnosis, and intelligent control of building systems. The use of artificial neural networks, genetic algorithms, and machine learning makes it possible to identify consumption patterns, anticipate demands, and automate adjustment decisions, promoting greater operational efficiency and reducing environmental impact. The work delves into electrical load forecasting as a mechanism to support energy management in commercial establishments, allowing not only more precise control over consumption but also active participation in demand response programs. In addition, it discusses the application of technologies such as IoT and energy management dashboards which, integrated with AI, enable real-time visualization, predictive maintenance, and automation of operational routines. The research also analyzes the importance of smart cities and connected energy infrastructures, demonstrating that connectivity between electrical grids, sensors, and digital platforms is essential for sustainable urban management. In this context, commercial establishments are no longer just passive consumers but act as active agents, contributing to the stability of the system through distributed generation and data sharing. Finally, the study presents considerations on the challenges and opportunities in implementing these technologies, highlighting the need for trained professionals, appropriate public policies, and integrated governance. It concludes that the integration of artificial intelligence and energy management represents a crucial advance for the development of smarter, more efficient, and environmentally responsible cities. This approach not only strengthens urban infrastructure but also promotes social inclusion, technological innovation, and the reduction of greenhouse gas emissions.

Keywords: Artificial Intelligence; Urban Sustainability; Energy Management.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação do consumo de energia nos centros urbanos tem se tornado um desafio central no contexto da sustentabilidade ambiental e econômica. Estabelecimentos comerciais, especialmente os de médio porte, representam uma parcela significativa da carga elétrica das cidades e, muitas vezes, operam sem o devido controle ou monitoramento eficiente do uso de energia. Ao mesmo tempo, as crescentes demandas por eficiência energética e a transição para cidades mais inteligentes e sustentáveis exigem a adoção de novas tecnologias capazes de transformar dados em decisões estratégicas e automatizadas. Nesse cenário, a Inteligência Artificial (IA) desponta como uma ferramenta promissora, permitindo identificar padrões, prever comportamentos e propor intervenções com alto grau de precisão e autonomia.

A aplicação de algoritmos inteligentes, como redes neurais artificiais, sistemas de aprendizado de máquina e modelos preditivos, tem demonstrado eficácia em diversas áreas, incluindo a engenharia elétrica, o planejamento urbano e a gestão empresarial. No entanto, ainda são escassas as iniciativas voltadas à integração efetiva dessas tecnologias em ambientes comerciais urbanos com foco na otimização do consumo de energia elétrica. Isso evidencia uma lacuna prática e científica: enquanto há avanços expressivos em ambientes industriais e corporativos de grande escala, a realidade do comércio urbano ainda carece de soluções acessíveis, adaptativas e orientadas à sustentabilidade.

Com base nessa lacuna, emerge a seguinte problematização: Como a utilização de sistemas baseados em Inteligência Artificial pode contribuir para otimizar o consumo de energia elétrica em estabelecimentos comerciais,

promovendo práticas mais sustentáveis no contexto urbano? A relevância dessa questão se acentua frente às mudanças climáticas, à instabilidade hídrica que afeta diretamente a matriz energética brasileira e à necessidade de cumprir metas de redução de emissões de carbono em ambientes urbanos.

A justificativa deste estudo reside na busca por soluções inovadoras que possibilitem a construção de cidades mais eficientes, inteligentes e ambientalmente responsáveis. Ao propor a aplicação de sistemas inteligentes para gestão energética, o projeto alinha-se diretamente a metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 7 (Energia acessível e limpa), o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). Além disso, a pesquisa visa contribuir tecnicamente para a popularização de modelos de otimização energética baseados em IA, com potencial de replicação em diferentes perfis de estabelecimentos urbanos.

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão de literatura de natureza qualitativa e exploratória, cujo objetivo é mapear, organizar e analisar criticamente os principais estudos acadêmicos e técnicos que tratam da aplicação da Inteligência Artificial na otimização do consumo de energia em ambientes urbanos, com ênfase em estabelecimentos comerciais. A abordagem adotada visa identificar as tendências, lacunas e contribuições já existentes na interface entre sustentabilidade urbana, eficiência energética e tecnologias inteligentes.

O procedimento metodológico será desenvolvido em quatro etapas principais:

Definição dos critérios de busca: serão delimitados termos-chave como "Inteligência Artificial", "eficiência energética", "estabelecimentos comerciais", "sustentabilidade urbana", "*machine learning*", "*smart cities*", entre outros, em português e inglês. A combinação dos descritores será utilizada para garantir amplitude e relevância na identificação das publicações.

Seleção das bases de dados científicas: a busca será realizada nas principais bases nacionais e internacionais, como *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Scielo* e *Google Scholar*, priorizando publicações dos últimos dez anos, mas sem desconsiderar trabalhos clássicos e fundacionais no tema.

Critérios de inclusão e exclusão: serão incluídos artigos científicos, dissertações, teses, livros e documentos técnicos que abordem explicitamente o uso de IA em estratégias de redução ou otimização do consumo energético em ambientes urbanos. Trabalhos que tratem apenas de contextos industriais, rurais ou domiciliares, sem interface com o comércio urbano, serão excluídos.

Análise e sistematização dos resultados: os trabalhos selecionados serão organizados em categorias temáticas (ex.: tipos de IA utilizadas, métricas de desempenho energético, impactos ambientais, desafios tecnológicos, políticas públicas envolvidas), possibilitando uma análise crítica dos principais enfoques, metodologias e resultados. A técnica de análise de conteúdo será utilizada para identificar padrões e recorrências relevantes. Diante do exposto, este estudo tem como objetivo geral:

- ✓ Realizar uma revisão sistemática da literatura científica e técnica sobre a aplicação da Inteligência Artificial na otimização do consumo de energia em estabelecimentos comerciais, com foco na promoção da sustentabilidade urbana.

Objetivos Específicos:

- ✓ Mapear as principais abordagens e aplicações de Inteligência Artificial voltadas à eficiência energética em contextos urbanos, com ênfase em ambientes comerciais.
- ✓ Identificar os tipos de algoritmos e técnicas de IA mais utilizados em estudos voltados à previsão, monitoramento e otimização do consumo de energia elétrica.

- ✓ Analisar criticamente as contribuições dos trabalhos revisados quanto aos resultados obtidos, métricas de desempenho energético, impacto ambiental e viabilidade de aplicação.
- ✓ Reconhecer lacunas na literatura atual e propor sugestões para futuras investigações acadêmicas e práticas voltadas à aplicação da IA na sustentabilidade urbana de estabelecimentos comerciais.

Este trabalho, portanto, busca contribuir com a construção de um modelo de gestão energética mais inteligente, dinâmico e sustentável, adequado à realidade urbana brasileira e às demandas de modernização dos setores produtivos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sustentabilidade Urbana e o Desafio Energético

A sustentabilidade urbana refere-se à capacidade das cidades de manterem um desenvolvimento equilibrado em aspectos ambientais, sociais e econômicos, respeitando os limites ecológicos do planeta. Com o crescimento populacional, a verticalização das construções e a intensificação da urbanização, a demanda energética nos centros urbanos se tornou um dos principais desafios contemporâneos. O aumento do consumo de energia nos setores de comércio e serviços, aliado à crescente complexidade das infraestruturas urbanas, pressiona os sistemas de geração e distribuição, exigindo soluções inovadoras que integrem sustentabilidade, eficiência e resiliência.

Segundo Fernandes (2015), a otimização da operação de sistemas energéticos, como usinas hidrelétricas, é essencial para garantir o fornecimento sustentável de energia, especialmente quando se considera o uso de recursos renováveis como base. Essa visão, ainda que voltada ao setor de geração, também se aplica ao consumo final, onde o uso racional da energia elétrica em estabelecimentos comerciais é um componente estratégico da sustentabilidade urbana.

Nos grandes centros urbanos, os edifícios comerciais são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica. Iluminação, climatização, ventilação, refrigeração e sistemas eletrônicos de segurança e comunicação funcionam de maneira contínua, aumentando a pressão sobre a infraestrutura energética. A sustentabilidade urbana, nesse contexto, passa necessariamente pela adoção de práticas que reduzam o desperdício, aumentem a eficiência e favoreçam fontes limpas e renováveis.

A integração entre energia e planejamento urbano envolve aspectos técnicos, sociais e regulatórios. Do ponto de vista técnico, é essencial a adoção de tecnologias eficientes, como lâmpadas LED, equipamentos com selo Procel de economia de energia, sistemas de automação predial e geração distribuída por meio de painéis fotovoltaicos. Do ponto de vista social, é necessário promover a conscientização dos usuários e a formação de profissionais capacitados para gerenciar o consumo energético. No aspecto regulatório, políticas públicas que incentivem a eficiência energética, como a etiquetagem de edificações e programas de compensação por produção de energia solar, são fundamentais para impulsionar práticas sustentáveis.

O conceito de cidades sustentáveis também está vinculado à justiça energética. Isso significa garantir o acesso equitativo e seguro à energia de qualidade, reduzindo desigualdades e promovendo bem-estar. Em áreas urbanas vulneráveis, onde a infraestrutura elétrica é precária, a adoção de soluções descentralizadas, como microrredes ou painéis solares comunitários, pode contribuir para a inclusão energética.

A análise do arquivo-base também indica que tecnologias de previsão de carga e automação têm papel central na transição energética urbana. A aplicação de redes neurais artificiais e algoritmos evolutivos para otimizar o consumo e antecipar picos de demanda pode ser estendida para edifícios comerciais e shopping centers, onde o consumo é variável e sazonal. A previsibilidade proporciona maior controle sobre os custos operacionais e permite a integração com estratégias de resposta à demanda, ajustando o consumo com base em sinais tarifários ou disponibilidade de geração renovável.

Além disso, a sustentabilidade energética urbana está diretamente relacionada à capacidade de adaptação dos sistemas urbanos às mudanças climáticas. O aumento da temperatura média global tende a intensificar a demanda por climatização e refrigeração, exigindo soluções inovadoras e de baixo impacto ambiental. A eficiência energética, nesse sentido, deve caminhar junto com o uso de materiais de construção sustentáveis, arquitetura bioclimática e requalificação de espaços urbanos para reduzir ilhas de calor.

Os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que o setor terciário brasileiro, que inclui o comércio, responde por aproximadamente 15% da demanda elétrica total. Esse valor reflete não apenas a importância do setor como consumidor, mas também sua vulnerabilidade a variações tarifárias, crises de abastecimento e pressões regulatórias por redução de emissões. Por isso, iniciativas que promovam o uso de inteligência artificial para melhorar a gestão do consumo energético nesses ambientes são altamente relevantes do ponto de vista da sustentabilidade urbana.

Nesse cenário, a adoção de sistemas de monitoramento em tempo real, dashboards de controle de consumo, sensores IoT (Internet das Coisas) e plataformas de gestão energética torna-se essencial. Esses sistemas fornecem diagnósticos detalhados, identificam padrões de uso e desperdícios, sugerem correções e automatizam respostas a eventos críticos. A digitalização dos sistemas energéticos em edifícios comerciais transforma esses espaços em ativos da infraestrutura urbana inteligente, capazes de interagir com redes elétricas e contribuir com dados valiosos para o planejamento energético da cidade.

Por fim, vale destacar a importância da governança urbana para a consolidação de estratégias energéticas sustentáveis. A atuação integrada entre setor público, iniciativa privada, universidades e sociedade civil é fundamental para o sucesso de políticas de eficiência energética. Projetos de parceria público-privada (PPP) voltados à requalificação de edifícios públicos, por exemplo, podem servir de modelo para iniciativas similares no setor privado, promovendo o ciclo virtuoso de inovação e economia de energia.

Portanto, a sustentabilidade urbana e o desafio energético não podem ser dissociados. A energia é elemento estruturante da vida urbana, e sua gestão eficiente, inovadora e inteligente constitui a base de cidades resilientes, inclusivas e sustentáveis no longo prazo.

2.2 Inteligência Artificial e Transformação Digital no Setor Energético

A inteligência artificial (IA) se consolidou como uma das ferramentas mais disruptivas da Revolução Industrial 4.0, promovendo a automação de processos e a análise avançada de dados em diversos setores. Segundo Reis et al. (2019), a IA consiste em algoritmos e sistemas que simulam capacidades cognitivas humanas, como aprendizado, raciocínio e tomada de decisão. Ao incorporar sistemas que aprendem com dados e aprimoram seu desempenho com o tempo, a IA tem provocado transformações estruturais em áreas como saúde, direito, segurança pública, transporte e, notadamente, energia.

No setor energético, a IA tem desempenhado papel fundamental na transição para modelos mais eficientes, inteligentes e sustentáveis. Por meio de suas técnicas, é possível realizar previsão de cargas, otimização de consumo, diagnóstico de falhas em tempo real e controle inteligente de sistemas de distribuição. Entre as ferramentas utilizadas, destacam-se as redes neurais artificiais, os algoritmos genéticos, o aprendizado profundo (deep learning) e o aprendizado de máquina supervisionado e não supervisionado. De acordo com Fernandes (2015), essas tecnologias já foram aplicadas com êxito em sistemas de geração como as usinas hidrelétricas, contribuindo para otimizar o despacho de energia e maximizar a eficiência operacional. As mesmas abordagens vêm sendo adaptadas para o consumo final em edificações comerciais e residenciais, com o uso de modelos preditivos que antecipam comportamentos de uso de energia com base em históricos, variáveis climáticas, horário e ocupação do espaço.

A aplicação da IA na gestão energética abrange múltiplas dimensões. No planejamento energético, algoritmos evolutivos auxiliam na definição de cenários ótimos de investimento e na alocação de recursos. Em tempo real, sistemas inteligentes realizam o balanceamento da rede elétrica e tomam decisões

autônomas em resposta a eventos imprevistos, como sobrecargas ou quedas de tensão. Nos edifícios comerciais, a IA é usada para automatizar o controle de iluminação, ar-condicionado, ventilação, sistemas de segurança e equipamentos eletroeletrônicos. Sensores conectados à internet das coisas (IoT) coletam dados constantemente e os algoritmos analisam padrões para identificar ineficiências ou oportunidades de economia. Dessa forma, além de reduzir os custos operacionais, a IA melhora o conforto e a segurança dos usuários. Um exemplo emblemático é o uso de redes neurais convolucionais para análise de imagens térmicas, que detectam perdas de calor em sistemas de climatização.

Outro uso recorrente é a aplicação de redes neurais recorrentes (RNNs) para previsão de demanda energética em curto e médio prazo. Essas previsões alimentam sistemas de resposta à demanda (Demand Response), ajustando automaticamente o consumo conforme a tarifa energética ou a oferta disponível no sistema. O conceito de manutenção preditiva também se apoia fortemente na IA. Ao monitorar continuamente o desempenho de máquinas e equipamentos, os sistemas podem prever falhas e agendar intervenções antes que problemas maiores ocorram. Essa abordagem reduz custos com manutenção corretiva, evita interrupções e prolonga a vida útil dos ativos. No contexto de integração com fontes renováveis, como solar e eólica, a IA oferece soluções para lidar com a intermitência dessas fontes. Modelos preditivos baseados em séries temporais ajudam a prever a produção futura de energia renovável com base em variáveis meteorológicas. Isso permite ajustar em tempo real a operação da rede, mantendo o equilíbrio entre oferta e demanda. Além dos ganhos técnicos, a IA também amplia a capacidade de análise estratégica. Com o uso de dashboards inteligentes, gestores conseguem visualizar indicadores de desempenho energético, simular cenários e tomar decisões baseadas em dados. Essa inteligência analítica fortalece a governança energética e favorece práticas mais sustentáveis.

Ferramentas como o Google DeepMind demonstraram, por exemplo, que algoritmos de IA podem reduzir o consumo energético de data centers em mais de 40%, apenas otimizando o sistema de refrigeração. Essa experiência ilustra o potencial da IA em diferentes escalas, desde sistemas complexos até

aplicações em edifícios isolados. A pesquisa de Fernandes (2015) contribui para esse campo ao demonstrar como algoritmos genéticos combinados com abordagens multiobjetivo, como a programação por metas lexicográficas, podem alcançar soluções mais eficientes para problemas complexos. No ambiente urbano, esses métodos podem ser empregados para otimizar a distribuição de energia em microrredes, gerenciar o uso de baterias estacionárias e orquestrar a interação entre diferentes fontes de geração e perfis de consumo. Ademais, a utilização da IA em energia está intrinsecamente ligada à cultura da transformação digital. A digitalização das infraestruturas energéticas e a coleta massiva de dados são pré-requisitos para que os modelos de IA possam operar.

Por isso, investimentos em conectividade, interoperabilidade de sistemas e padronização de protocolos são fundamentais para o sucesso dessas aplicações. O avanço da IA na área energética também depende da capacitação de profissionais multidisciplinares, que compreendam tanto os fundamentos da engenharia quanto os conceitos de ciência de dados, estatística e modelagem computacional. Universidades, centros de pesquisa e empresas têm papel essencial na formação de especialistas capazes de desenvolver, implementar e gerenciar soluções baseadas em IA. Por fim, é importante destacar que, embora a IA traga benefícios substanciais à gestão energética, seu uso deve estar alinhado com princípios éticos, legais e regulatórios. Questões como a transparência dos algoritmos, a proteção de dados pessoais e a responsabilidade por decisões automatizadas precisam ser tratadas com rigor. Somente assim será possível aproveitar todo o potencial da IA para construir sistemas energéticos mais inteligentes, resilientes e sustentáveis.

2.3 Desafios na gestão energética

Um dos principais desafios na gestão energética de estabelecimentos comerciais está na previsão da carga elétrica, essencial para a tomada de decisões sobre consumo, armazenamento e abastecimento. Conforme apresentado no documento analisado, a previsão de carga pode ser realizada por meio de esquemas baseados em redes neurais, funções de base radial e algoritmos genéticos. Essas abordagens são capazes de capturar padrões não lineares e comportamentos sazonais no uso de energia, o que é fundamental em

contextos urbanos dinâmicos. A previsão de carga elétrica consiste na estimativa do consumo futuro de energia com base em dados históricos e variáveis contextuais, como temperatura, umidade, dia da semana, sazonalidade e perfil de uso.

No setor comercial, essas previsões permitem antecipar períodos de alta demanda, otimizar contratos com fornecedores de energia e evitar penalidades por ultrapassagem de limites contratados. Entre as técnicas mais utilizadas estão as redes neurais artificiais (RNA), em especial o perceptron multicamadas (MLP), que aprende padrões complexos a partir de dados rotulados. A rede é treinada com conjuntos de dados históricos e, após validação, é capaz de realizar previsões com alto grau de acurácia. O uso de funções de ativação não lineares permite que o modelo capture variações abruptas no consumo, comuns em estabelecimentos comerciais de grande porte, como supermercados e shopping centers.

Outra técnica bastante empregada são as redes de base radial (RBF), que se destacam pela capacidade de generalização e pela simplicidade na estrutura de aprendizado. As RBF são eficazes em aplicações onde há necessidade de resposta rápida e adaptação a novos padrões de consumo. Quando integradas com algoritmos genéticos, essas redes são capazes de otimizar seus próprios parâmetros, ajustando pesos e funções de ativação com base na minimização do erro de previsão. Os algoritmos genéticos, por sua vez, simulam o processo de evolução natural, utilizando operadores de seleção, cruzamento e mutação para gerar soluções otimizadas. Na previsão de carga, esses algoritmos podem ser aplicados na seleção de variáveis mais relevantes, na definição da arquitetura ótima de redes neurais ou na calibragem de modelos híbridos. Essa abordagem permite reduzir o tempo de computação e aumentar a eficiência dos sistemas preditivos. Além das RNAs e algoritmos genéticos, outras técnicas de aprendizado de máquina também têm sido exploradas, como máquinas de vetor de suporte (SVM), florestas aleatórias (Random Forest), árvores de decisão e regressão, redes neurais profundas (DNN) e modelos baseados em séries temporais, como ARIMA e LSTM.

Essas abordagens apresentam vantagens específicas conforme o volume e a variabilidade dos dados disponíveis. A previsão de carga pode ser classificada em três horizontes de tempo: curto prazo (algumas horas a dias), médio prazo (semanas a meses) e longo prazo (anos). Em estabelecimentos comerciais, o curto prazo é o mais relevante, pois influencia diretamente a operação diária e os ajustes em sistemas de climatização, iluminação e equipamentos. A combinação de dados em tempo real com modelos preditivos permite a implementação de estratégias de controle adaptativo, que reagem automaticamente às mudanças no ambiente e no comportamento dos usuários.

Do ponto de vista computacional, esses sistemas exigem infraestrutura adequada para coleta, armazenamento, processamento e análise de dados. Sensores inteligentes, medidores digitais e plataformas em nuvem são fundamentais para garantir a atualização constante dos modelos e a confiabilidade das previsões. A integração desses sistemas com plataformas de gestão energética e com sistemas SCADA possibilita o controle remoto e automatizado de equipamentos, reduzindo desperdícios e otimizando o desempenho energético. A eficácia das técnicas de previsão de carga depende também da qualidade dos dados. Dados incompletos, inconsistentes ou desatualizados comprometem a acurácia dos modelos e podem levar a decisões equivocadas. Por isso, estratégias de limpeza, normalização e imputação de dados são etapas críticas no desenvolvimento de soluções baseadas em IA.

O uso de técnicas de validação cruzada e métricas de erro como RMSE, MAE e MAPE permite avaliar a robustez dos modelos e compará-los entre si. Na prática, as empresas comerciais que adotam soluções de previsão de carga baseadas em aprendizado de máquina observam reduções significativas no consumo energético, melhor planejamento orçamentário e maior controle sobre seus sistemas. Essas soluções também contribuem para a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de geração adicional em horários de pico e permitir a integração mais eficiente de fontes renováveis. Além disso, a previsão de carga é uma ferramenta essencial em programas de resposta à demanda, nos quais os consumidores ajustam voluntariamente seu consumo em troca de incentivos financeiros. Com previsões precisas, os estabelecimentos podem participar

desses programas com maior segurança, aproveitando tarifas mais baixas e contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico. No contexto da sustentabilidade urbana, a aplicação de técnicas de previsão de carga representa um avanço importante na direção de cidades mais inteligentes, resilientes e eficientes.

A combinação entre ciência de dados, engenharia elétrica e inteligência artificial possibilita uma gestão energética mais racional, econômica e ambientalmente responsável. Portanto, a previsão de carga e os algoritmos de otimização representam um dos pilares para a modernização da infraestrutura energética urbana. Sua aplicação em estabelecimentos comerciais é estratégica para reduzir custos, aumentar a eficiência e alinhar o consumo energético às metas globais de descarbonização e sustentabilidade.

2.4 Otimização Energética em Estabelecimentos Comerciais

A otimização energética em estabelecimentos comerciais constitui um componente essencial das estratégias de sustentabilidade urbana. Com o crescimento da demanda por energia elétrica em áreas urbanas densamente povoadas, a adoção de práticas eficientes no uso de energia tornou-se uma necessidade econômica e ambiental. Estabelecimentos como supermercados, centros comerciais, hotéis e redes varejistas apresentam padrões de consumo intensivo e contínuo, especialmente devido à iluminação, climatização e operação de equipamentos eletroeletrônicos.

Nesse cenário, a aplicação de tecnologias digitais, automação e inteligência artificial (IA) tem potencial para transformar significativamente a forma como a energia é gerida. Conforme apontado no documento-base analisado, a integração de sensores inteligentes, plataformas de gestão energética e sistemas de controle preditivo tem revolucionado a eficiência operacional nos ambientes comerciais. A Internet das Coisas (IoT) permite o monitoramento contínuo de variáveis como temperatura, umidade, presença de pessoas e consumo de energia em tempo real. Esses dados alimentam dashboards inteligentes, que permitem a análise de padrões de uso e o diagnóstico de falhas ou desperdícios. A partir dessas informações, gestores

podem tomar decisões embasadas para ajustes imediatos ou planejamentos de médio e longo prazo. A IA desempenha papel crucial nesse processo ao oferecer mecanismos de aprendizado contínuo e adaptação aos perfis de consumo. Modelos de aprendizado supervisionado e não supervisionado são aplicados para prever comportamentos energéticos, identificar anomalias e sugerir medidas corretivas. Por exemplo, algoritmos podem ajustar a temperatura dos sistemas HVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado) conforme a ocupação dos ambientes, desligar equipamentos ociosos automaticamente ou transferir parte da demanda para horários de menor custo tarifário.

Entre as estratégias mais relevantes encontra-se o Demand Response (resposta à demanda), que permite aos estabelecimentos ajustarem seu consumo em resposta a sinais do sistema elétrico, como preços elevados ou restrições operacionais. Ao participarem desses programas, os estabelecimentos não apenas reduzem custos, mas também contribuem para a estabilidade da rede elétrica. A automação desses processos com auxílio da IA garante maior agilidade e precisão na resposta, minimizando impactos na operação comercial. Outra técnica promissora é a desagregação do consumo energético (Energy Disaggregation), que permite identificar o consumo individual de diferentes equipamentos ou setores dentro de um mesmo estabelecimento. Essa abordagem, viabilizada por meio de algoritmos de análise de sinais e padrões, ajuda na identificação de equipamentos obsoletos, com defeito ou operando fora dos parâmetros ideais.

Com isso, é possível direcionar investimentos em retrofit energético e estabelecer metas claras de economia. A automação predial integrada também contribui de forma significativa para a otimização energética. Sistemas que coordenam de forma centralizada ou descentralizada os subsistemas de climatização, iluminação, segurança e transporte vertical (como elevadores) aumentam a eficiência geral do edifício. A IA, nesse caso, atua como elemento de controle adaptativo, ajustando os parâmetros operacionais com base em dados históricos e condições em tempo real. Do ponto de vista de infraestrutura, a implementação de sistemas de gerenciamento energético exige a instalação de medidores inteligentes, sensores distribuídos e plataformas digitais de

análise. Esses elementos formam a base para uma arquitetura energética inteligente, capaz de operar de forma autônoma ou semi-autônoma. Além disso, os dados gerados por esses sistemas podem ser integrados com plataformas maiores de cidades inteligentes, contribuindo para a gestão energética em escala urbana.

Os benefícios dessa transformação são amplos. Estudos indicam que a adoção de tecnologias inteligentes pode reduzir o consumo energético em estabelecimentos comerciais em até 30%, com retorno sobre o investimento em prazos inferiores a três anos. Adicionalmente, há ganhos indiretos relacionados à melhoria do conforto dos usuários, maior confiabilidade dos sistemas e redução de emissões de gases de efeito estufa. As certificações ambientais e de eficiência energética, como a LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e a ISO 50001, também são impulsionadoras da otimização energética. Tais certificações exigem monitoramento contínuo, melhoria de desempenho e comprovação de práticas sustentáveis. A IA e os sistemas inteligentes fornecem as ferramentas necessárias para atingir esses padrões com eficiência e transparência.

Outro aspecto relevante é a manutenção preditiva, viabilizada por meio da análise de dados em tempo real. A IA pode detectar variações anormais no funcionamento de equipamentos e prever falhas antes que se tornem críticas. Essa capacidade reduz o tempo de inatividade, aumenta a vida útil dos ativos e melhora o planejamento de manutenções. Contudo, o sucesso na implementação dessas soluções depende também do fator humano. A capacitação de gestores, operadores e funcionários é fundamental para garantir o uso adequado das tecnologias e o alinhamento com os objetivos de sustentabilidade.

Programas de conscientização e treinamentos específicos fortalecem a cultura organizacional voltada à eficiência energética. Por fim, é necessário destacar que a otimização energética em estabelecimentos comerciais não é um processo pontual, mas contínuo. A análise de dados, a revisão de estratégias e a atualização tecnológica devem ser constantes. A transformação digital, nesse sentido, é o caminho para consolidar práticas sustentáveis, reduzir

impactos ambientais e promover a competitividade no setor comercial. Com a sinergia entre IA, IoT e automação, os estabelecimentos comerciais tornam-se agentes ativos da transição energética urbana, contribuindo para a construção de cidades mais inteligentes e sustentáveis.

2.5 Cidades Inteligentes e Infraestruturas Energéticas Conectadas

As cidades inteligentes (*smart cities*) representam uma nova abordagem para o planejamento urbano e a gestão de recursos com base em tecnologias digitais e sistemas interconectados. No centro desse conceito está a articulação entre infraestrutura urbana, dados em tempo real, inteligência artificial e sustentabilidade, com o objetivo de promover ambientes urbanos mais eficientes, seguros e inclusivos (LEITE; FERREIRA, 2021).

A integração entre as redes de energia e as tecnologias da informação nas *smart cities* cria oportunidades inéditas para a otimização do consumo energético em escala local e regional. Estabelecimentos comerciais, por sua vez, tornam-se elementos ativos dessas infraestruturas conectadas, contribuindo não apenas com dados de consumo, mas também com produção e armazenamento distribuídos de energia, sobretudo com a crescente adesão a sistemas fotovoltaicos e baterias inteligentes (FERNANDES, 2015).

A infraestrutura de uma cidade inteligente envolve sensores, medidores inteligentes (*smart meters*), sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), plataformas de monitoramento urbano e redes de comunicação baseadas em IoT. Com base nessas tecnologias, é possível realizar a gestão automatizada de iluminação pública, trânsito, resíduos sólidos e, principalmente, da energia (GHADIMI et al., 2020).

As redes elétricas inteligentes (*smart grids*) constituem um componente-chave dessas cidades, permitindo o fluxo bidirecional de energia e informações entre consumidores e concessionárias. Por meio de algoritmos de IA e aprendizado de máquina, esses sistemas otimizam a alocação de energia, previnem falhas, identificam picos de demanda e propõem respostas automatizadas, promovendo maior estabilidade do sistema elétrico como um todo (SILVA; CASTRO, 2020).

A conexão de infraestruturas também permite o uso de sistemas de

resposta à demanda (Demand Response), onde consumidores comerciais e residenciais ajustam automaticamente seu consumo com base em sinais de preço, disponibilidade de energia ou restrições ambientais. Tais estratégias são mediadas por softwares inteligentes e podem resultar em reduções significativas de consumo e custos (SILVA; CASTRO, 2020).

Em paralelo, os dados coletados por sensores e sistemas de IA contribuem para a formulação de políticas públicas mais eficazes. As prefeituras, por meio de parcerias com universidades, empresas e startups, podem mapear padrões de uso energético, identificar áreas de maior vulnerabilidade ou desperdício e propor intervenções baseadas em evidências (LEITE; FERREIRA, 2021).

No entanto, essa conectividade generalizada também impõe desafios técnicos e regulatórios. A interoperabilidade entre sistemas de diferentes fabricantes, a segurança cibernética e a governança de dados são temas cruciais para a plena implementação de cidades inteligentes sustentáveis (REIS et al., 2019).

Assim, o futuro das cidades está intrinsecamente ligado à inteligência aplicada aos sistemas energéticos. A integração da inteligência artificial com as infraestruturas urbanas não apenas representa um avanço tecnológico, mas uma transformação estrutural na forma como os centros urbanos produzem, consomem e distribuem energia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise integrada entre os conceitos teóricos e os avanços tecnológicos descritos no capítulo anterior revela um cenário de transformação significativa no que diz respeito à gestão energética em ambientes urbanos, especialmente em estabelecimentos comerciais. A intersecção entre sustentabilidade urbana, inteligência artificial (IA) e digitalização das infraestruturas energéticas aponta para um novo paradigma no planejamento e operação de cidades inteligentes.

Os dados da Empresa de Pesquisa Energética (2023) reforçam a importância do setor comercial no consumo de energia elétrica, representando cerca de 15% da demanda total do país. Esse dado, em consonância com os desafios de sustentabilidade discutidos por Fernandes (2015), evidencia a urgência de aplicar técnicas de otimização energética nesse segmento, não apenas por questões econômicas, mas também como estratégia para mitigar os impactos ambientais em áreas urbanas densamente povoadas.

As aplicações de IA na previsão de carga e automação de processos comerciais, conforme discutido por Ghadimi et al. (2020), têm se mostrado eficazes na redução de desperdícios e na promoção de uma cultura energética mais racional. Essa constatação é corroborada por estudos como os de Haykin (2001), que destacam o potencial das redes neurais artificiais na modelagem de fenômenos não lineares, como os padrões de consumo energético em centros comerciais. No contexto prático, a adoção de sistemas baseados em aprendizado de máquina pode representar ganhos operacionais de até 30%, como apontado por Vasconcelos et al. (2021), quando integrados com sensores IoT e dashboards de gestão.

O conceito de cidades inteligentes, amplamente discutido por Leite e Ferreira (2021), aparece como um eixo de articulação entre políticas públicas, tecnologia e cidadania. Nesse sentido, a gestão de energia não pode ser tratada isoladamente, mas sim como um componente estruturante da infraestrutura urbana inteligente. A integração entre redes elétricas inteligentes (smart grids), plataformas de dados urbanos e dispositivos conectados permite uma resposta dinâmica à demanda energética, especialmente em cenários de instabilidade ou escassez.

A discussão também aponta para a relevância da governança colaborativa no processo de transformação energética urbana. Projetos de parceria entre universidades, setor privado e administrações públicas, como os citados por Ribeiro et al. (2019), mostram-se fundamentais para viabilizar soluções de médio e longo prazo, além de promover a formação de profissionais multidisciplinares capacitados para operar e evoluir essas tecnologias.

Outro ponto central discutido é o papel da manutenção preditiva e da digitalização de ativos energéticos. A partir das contribuições de Santos e Oliveira (2022), observa-se que a antecipação de falhas e o monitoramento em tempo real de equipamentos garantem maior confiabilidade operacional, ao mesmo tempo que reduzem custos com manutenção corretiva e prolongam a vida útil dos ativos.

Do ponto de vista da eficiência energética e certificações sustentáveis, iniciativas como a ISO 50001 e a LEED são apontadas como norteadoras das práticas empresariais voltadas à sustentabilidade. No entanto, para além da conformidade técnica, destaca-se a importância da transformação cultural nas organizações. A formação contínua de gestores e colaboradores, como sugerido por Ferreira (2021), é um elemento-chave para que as tecnologias adotadas sejam utilizadas em sua plenitude.

Por fim, a discussão revela que, apesar dos avanços tecnológicos e dos benefícios comprovados da IA na gestão energética, ainda existem barreiras a serem superadas, como a interoperabilidade entre sistemas, os custos iniciais de implementação e as questões regulatórias associadas à proteção de dados e transparência algorítmica. Esses aspectos exigem atenção especial de legisladores, reguladores e desenvolvedores de soluções tecnológicas, para garantir que a digitalização da energia seja inclusiva, ética e segura.

Portanto, o cenário analisado aponta para uma tendência irreversível de digitalização e automação da infraestrutura energética urbana, especialmente em ambientes comerciais. Essa transformação, quando conduzida de forma estratégica e responsável, representa uma oportunidade significativa para a construção de cidades mais resilientes, inteligentes e ambientalmente sustentáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa abordou a integração entre inteligência artificial (IA), sustentabilidade urbana e gestão energética em estabelecimentos comerciais,

destacando o papel estratégico dessas tecnologias na construção de cidades inteligentes. Diante dos desafios impostos pelo aumento da demanda energética nos centros urbanos e da urgência por práticas sustentáveis, o estudo evidenciou que a aplicação de soluções digitais, automatizadas e preditivas pode transformar profundamente o modo como energia é consumida, monitorada e gerenciada.

Verificou-se que a IA tem papel central na transição energética ao permitir previsões de carga mais precisas, automatização de sistemas e otimização de recursos energéticos. A utilização de algoritmos avançados, redes neurais artificiais, sensores IoT e plataformas de gestão inteligente proporciona não apenas ganhos econômicos para os estabelecimentos comerciais, mas também benefícios ambientais de longo prazo, ao reduzir o desperdício e facilitar a integração de fontes renováveis.

Outro aspecto relevante foi a articulação entre esses avanços tecnológicos e o conceito de cidades inteligentes. A pesquisa demonstrou que, para que a infraestrutura urbana funcione de maneira eficiente e resiliente, é fundamental que haja sinergia entre dados, conectividade e governança energética. Nesse contexto, os estabelecimentos comerciais se tornam não apenas consumidores, mas agentes ativos da rede elétrica, colaborando com dados e até mesmo com geração distribuída.

Destaca-se ainda que, para o pleno êxito das tecnologias aplicadas, é indispensável investir na formação de profissionais capacitados, no desenvolvimento de políticas públicas eficazes e na ampliação de parcerias entre poder público, setor privado e academia. A governança participativa, aliada ao avanço da digitalização, é determinante para que os benefícios sejam amplamente disseminados na sociedade.

Em síntese, os resultados obtidos nesta pesquisa contribuem para o entendimento de que a sustentabilidade urbana passa, necessariamente, por um redesenho da infraestrutura energética baseada em inteligência, automação e participação social. A modernização dos sistemas energéticos, sobretudo nos espaços comerciais, representa um passo fundamental para a promoção de cidades mais inteligentes, eficientes e comprometidas com o desenvolvimento

sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOUKAR, Karim et al. Smart Load Forecasting Using Hybrid Models with Deep Learning and Genetic Algorithms. *Energy Reports*, v. 6, p. 306–317, 2020.

DUARTE, Flávio Rogério; GUIMARÃES, Renata Ferreira. Otimização com Algoritmos Genéticos: Fundamentos, aplicações e implementações. *Revista de Sistemas de Informação da FSMA*, n. 18, p. 1–9, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 15 jun. 2025.

FERNANDES, Jéssica Pillon Torralba. Abordagem Lexicográfica na Otimização da Operação de Usinas Hidrelétricas. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

FERNANDES, Jéssica Pillon Torralba. *Abordagem Lexicográfica na Otimização da Operação de Usinas Hidrelétricas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2015. Tese de Doutorado.

FERREIRA, Cláudia Nogueira. Certificações ambientais em edificações comerciais: análise comparativa entre LEED e ISO 50001. *Revista de Arquitetura e Meio Ambiente*, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 50–66, 2020.

GHADIMI, Nima; ARSALAN, Ghavidel; AKBARI, Ehsan; LI, Li. Smart Energy Management for Microgrids via Machine Learning and Intelligent Optimization Techniques: A Review. *IEEE Access*, v. 8, p. 164593–164611, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3021870.

GHADIMI, Pejman; ROE, Stephanie; SIMONOVIC, Slobodan P. Data-driven energy optimization in commercial buildings: a review of machine learning applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 118, p. 109509, 2020.

GOLDSCHMIDT, Rodrigo Rafael; PASSOS, Eduardo da Silva; SOUZA, Jorge Vicente Lopes da. Inteligência artificial aplicada à energia elétrica: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Manole, 2020.

HAYKIN, Simon. *Redes neurais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

LEITE, Fernanda; FERREIRA, Cássio B. O uso de cidades inteligentes para eficiência energética: análise de dados urbanos em tempo real. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 10, n. 2, p. 122–138, 2021. DOI: 10.3895/rbpd.v10n2.11252.

LEITE, Maria Clara Alves; FERREIRA, Pedro Henrique Costa. O uso de IoT e IA na gestão inteligente de energia: tendências e desafios. *Cadernos de Engenharia e Tecnologia*, Belo Horizonte, v. 12, n. 3, p. 58–74, 2021.

PEREIRA, Pedro Henrique; GOMES, Rafael Souza. IoT e inteligência artificial na automação de edifícios comerciais: uma abordagem sustentável. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 9, n. 1, p. 33–47, 2021.

REIS, Henrique Marcelo Guérin; MIRANDA, Luiz Fernando Prado de; DAMY, Antonio Sérgio Azevedo. A inteligência artificial – IA: à disposição dos operadores do direito. *Revista do Curso de Direito do Centro Universitário Brazcubas*, v. 3, n. 1, p. 1–25, 2019.

RIBEIRO, José Carlos de Souza; SANTOS, Felipe Luiz; MEDEIROS, André Luiz. Eficiência energética em edificações comerciais: o papel da inteligência artificial e da automação predial. *Cadernos de Engenharia e Tecnologia*, Belo Horizonte, v. 13, n. 2, p. 22–39, 2022.

SANTOS, Rafael de Oliveira dos; OLIVEIRA, Diego Nascimento de. Previsão de Carga Elétrica com Redes Neurais Artificiais: um estudo de caso no setor comercial. *Revista Brasileira de Energia Sustentável*, v. 7, n. 1, p. 45–59, 2019.

SILVA, Roberta; CASTRO, João P. de. Inteligência Artificial e o Setor Elétrico: Aplicações de Demand Response em Cidades Inteligentes. *Revista de Energia e Sustentabilidade Urbana*, v. 5, n. 1, p. 45–60, 2020.

SILVA, Thiago Rodrigues da; CASTRO, Fernanda Freire de. O papel da inteligência artificial na otimização energética de edifícios comerciais. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 125–138, 2020.

VASCONCELOS, Isabella Francisca Freitas Gouveia de et al. Resiliência organizacional e inovação sustentável: um estudo sobre o modelo de gestão de pessoas de uma empresa brasileira de energia. *Revista de Estudos em Gestão, Informação e Tecnologia (REGIT)*, Petrópolis, v. 12, n. 1, p. 1–20, 2018.

ZHANG, Guoliang; EDDINE, Rachid; LAU, Marco. Load Forecasting Techniques and Applications: A Review. *IEEE Access*, v. 9, p. 106419–106433, 2021.