



Direito (Internet, Tecnologia e Sociedade no Contexto da Defesa dos Direitos Humanos)

## **INTELIGÊNCIA SUSTENTÁVEL: APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA GESTÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL**

Fernanda Guedes Queiroz de Lira<sup>1</sup>

Elias Jacob de Menezes Neto<sup>2</sup>

### **RESUMO**

O direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado continua sendo um desafio significativo. O setor energético, por sua vez, busca constantemente novas tecnologias para promover a preservação ambiental. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) emerge como uma solução promissora para introduzir inovações no setor energético. Em contrapartida, este trabalho investigou o uso de técnicas de inteligência artificial (IA) para otimizar a eficiência e a gestão de sistemas energéticos renováveis, com foco na redução de custos operacionais e maximização da produção de energia sustentável. A metodologia incluiu uma revisão abrangente da literatura nas áreas de sistemas energéticos e inteligência artificial, buscando compreender suas interações e sinergias. A problemática central abordada foi a necessidade urgente de transição para uma energia de baixo carbono (LCET), frente aos desafios ambientais e econômicos decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis. Além disso, foram examinadas as principais aplicações da inteligência artificial na previsão de geração de energia eólica e solar, otimização da distribuição de energia, gestão de microrredes e modelagem de células solares. A pesquisa destacou os benefícios potenciais da inteligência artificial, como a melhoria da eficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que abordou desafios, como o consumo energético das tecnologias de inteligência artificial e questões éticas associadas ao uso de grandes volumes de dados.

**Palavras-chave:** Inteligência Artificial; Setor Energético; Sustentabilidade; Desenvolvimento Tecnológico.

### **1 INTRODUÇÃO**

O progresso da sociedade está intimamente ligado ao uso de recursos energéticos. A demanda por energia aumenta exponencialmente com o crescimento populacional global, a urbanização e o desenvolvimento econômico. Historicamente, fontes de energia não renováveis, como carvão, gás natural e petróleo, têm sido amplamente utilizadas para atender a

---

<sup>1</sup>Mestranda em Direito pela UFRN. E-mail: fernanda.lira.118@ufrn.edu.br. Lattes <http://lattes.cnpq.br/2389175092181567>

<sup>2</sup>Professor de aprendizado de máquina do Instituto Metr pole Digital da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: elias.jacob@ufrn.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9152955193794784>



# 26º Seminário de Pesquisa do CCSA

Crise Climática, Desenvolvimento e Democracia  
23 a 27 de setembro de 2024

essa demanda. No entanto, o rápido esgotamento desses recursos tem causado efeitos adversos significativos, incluindo mudanças climáticas e aquecimento global, devido às altas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esses efeitos incluem o aumento do nível do mar, derretimento de geleiras, destruição de florestas, poluição do ar e esgotamento da camada de ozônio, ameaçando substancialmente os setores econômico e social (Abdalla *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a transição para uma energia de baixo carbono (LCET) tornou-se uma prioridade para governos e acadêmicos desde o início do século XXI. Diante do aquecimento global, desastres naturais recorrentes e a redução de espaços habitáveis, a diminuição do consumo de combustíveis fósseis e das concentrações de gases de efeito estufa emergiu como uma solução essencial. Ademais, dada a finitude dos combustíveis fósseis, é imperativo adotar medidas que garantam a sustentabilidade do ecossistema energético global, assegurando um legado energético viável para as futuras gerações (Bennagi *et al.*, 2024).

Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que, em seu objetivo 7, destaca a importância de reduzir a intensidade energética e acelerar a implantação de energia limpa para atingir metas climáticas duradouras. Dessa forma, a energia renovável, como substituta dos combustíveis fósseis, protege a produção industrial, promove o crescimento econômico e reduz os riscos ambientais ao gerar menores quantidades de gases de efeito estufa. Conseqüentemente, a transição para uma maior dependência de fontes de energia renováveis tornou-se o foco central de inúmeras pesquisas atuais (Silva, 2024).

Nesse contexto, as abordagens convencionais para alcançar energias de baixo carbono incluem estratégias como aumento dos investimentos de capital, políticas governamentais favoráveis e aprimoramento das capacidades tecnológicas. Diante desse cenário, a Inteligência Artificial (IA), considerada uma das tecnologias mais revolucionárias da era moderna, tem transformado operações corporativas e paradigmas laborais, impulsionando o progresso social.

Segundo a *International Data Corporation* (IDC), o mercado de inteligência artificial foi avaliado em 156,5 bilhões de dólares em 2020, com previsão de dobrar nos próximos quatro anos. A inteligência artificial exerce um impacto significativo na transição energética, facilitando o planejamento e a operação de sistemas de energia inteligentes, além de mitigar



obstáculos à disseminação de energia renovável, como o carregamento inteligente e a integração veículo-rede (V2G) (Bennagi *et al.*, 2024).

Nessa perspectiva, estudos indicam que a inteligência artificial aumentou a eficiência energética em 97,32%, melhorando a capacidade de integração de energia renovável. A inteligência artificial também oferece soluções promissoras para a transição energética, reduzindo o estresse na distribuição de energia e aprimorando a confiabilidade de baterias e instalações correlatas. No entanto, há preocupações sobre o consumo de energia das novas tecnologias de inteligência artificial, que exigem grandes quantidades de energia para armazenamento de dados e cálculos intensivos (Abdalla *et al.*, 2021).

Entretanto, embora a inteligência artificial requeira uma grande quantidade de energia para sua utilização, ela possui o potencial de transformar indústrias, promover a inovação científica e tecnológica e acelerar o progresso da energia limpa. Esse potencial pode compensar o efeito de rebote energético, pois a prosperidade da energia de baixo carbono proporcionada pela inteligência artificial pode suprir a lacuna na taxa de energia renovável, beneficiando a transição energética futura (Abdalla *et al.*, 2021).

Sendo assim, este trabalho busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: "Como a aplicação de técnicas de inteligência artificial pode otimizar a eficiência e a gestão de sistemas energéticos renováveis, contribuindo para a redução de custos operacionais e a maximização da produção de energia sustentável?", bem como possui como objetivo principal o de investigar o uso de algoritmos de inteligência artificial para a otimização de sistemas energéticos renováveis, com foco na melhoria da eficiência, gestão de recursos e redução de custos operacionais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 DIREITO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E AO MEIO AMBIENTE ECOLÓGICAMENTE EQUILIBRADO SOB À ÓTICA DA ANÁLISE ECONÔMICA DO DIREITO**

O conceito de desenvolvimento sustentável não surgiu de forma instantânea, mas é resultado de inúmeras conferências ambientais e da constatação de diversas atividades prejudiciais ao meio ambiente, que levaram à compreensão de que os recursos ambientais são



limitados e devem ser utilizados de forma cautelosa. Seguindo essa linha de pensamento, o modelo de um Estado Socioambiental de Direito é uma concepção contemporânea originada das discussões ambientais do pós-guerra. Este modelo protege os direitos fundamentais em uma esfera intergeracional, ultrapassando a individualidade e a coletividade, tratando-se de um bem difuso cujo titular é toda a humanidade (Dias, 2009).

Nesse sentido, a criação de um Estado Social e o Estado Ambiental seriam consequências do dever jurídico-estatal de proteção à dignidade humana, de forma a atualizar os novos valores humanos que são incorporados ao conteúdo normativo, exigindo-se assim uma medida mínima de proteção ambiental (Barbalho, 2015).

Seguindo por essa perspectiva, a ideia de proteção ambiental como direito fundamental, abrange a natureza em todos os seus elementos essenciais à vida humana, bem como o equilíbrio ecológico, pois este visa tutelar a qualidade do meio ambiente em função da qualidade de vida, na perspectiva de um direito fundamental (Silva, 2007).

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, na perspectiva dos direitos fundamentais, traz o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, abrindo para a possibilidade para a definição de políticas públicas, bem como para a harmonização entre os interesses econômicos e ambientais (Brasil, 1988).

Nesse contexto, a Análise Econômica do Direito (AED) destaca-se por introduzir a eficiência como um conceito fundamental, proporcionando uma perspectiva econômica do Direito que estreita a conexão entre esses campos. O Direito regula áreas como relações de consumo, estruturas societárias, mercados de capitais, concorrência empresarial e legislação antitruste. A Economia, por sua vez, contribui analisando o comportamento resultante da aplicação das leis, considerando as circunstâncias que influenciam as escolhas de cumprimento ou violação contratual, bem como as perspectivas de sucesso ou fracasso em litígios futuros (Oliveira Filho, 2012).

Diante disso, após as inovações legislativas e doutrinárias surge o Estatuto das Cidades com o objetivo de regulamentar a Política Nacional de Desenvolvimento Urbano através de uma verdadeira política pública que possui diretrizes, instrumentos e objetivos. O Estatuto da Cidade foi responsável por estabelecer uma política urbana focada em ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana (Brasil, 2001).



Contudo, existe a necessidade da busca pelo desenvolvimento sustentável mundial, decorrente disso, a Organização das Nações Unidas (ONU), em 2015, criou a Agenda 2030, composta por 17 objetivos interdependentes definidos como Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), cujo documento tem sido utilizado mundialmente como uma importante referência para a gestão, principalmente, na gestão em busca do direito à cidade sustentável (ONU, 2024).

O termo direito à cidade, advém da obra homônima, lançada em 1968, de autoria do filósofo francês Henry Lefebvre, responsável por realizar fortes críticas às contradições existentes nos espaços urbanos, causadas, em regra, pelo modo de produção capitalista, o qual era responsável por excluir uma parcela da população do acesso à cidade, de modo que este direito seria responsável por representar a liberdade, socialização, participação, apropriação da cidade por esses excluídos (Brandt, 2019).

Ademais, o termo cidade sustentável enfrenta críticas por focar apenas em objetivos sociais, econômicos, políticos, culturais e institucionais. A cidade sustentável deve integrar diversas ações que promovam a inclusão urbana como um todo. Pensar no direito à cidade significa garantir justiça social nos espaços urbanos sem priorizar apenas um aspecto social. O direito à cidade deve ser assegurado a todos, independentemente de gênero, raça, classe, origem, sexo ou qualquer outra forma de discriminação (Dias, 2009).

Sob uma outra perspectiva, a cidade atual possui inúmeros problemas, dentre eles o de garantir o acesso à energia elétrica para todos enquanto garante também o fomento de práticas que auxiliem no desenvolvimento de formas de energia capazes de evitar o desperdício e garantir um fornecimento sustentável (Ferraz Junior, 2023).

Portanto, no contexto do direito à cidade e ao acesso à energia sustentável, é necessário adotar novas práticas para garantir o desenvolvimento sustentável e a inclusão urbana. A aplicação da inteligência artificial (IA) na conservação de energia e nas energias renováveis representa um avanço significativo, pois a IA pode otimizar a gestão de recursos, prever padrões de consumo, melhorar a eficiência das redes elétricas e promover o uso sustentável de fontes renováveis. Na próxima seção, será discutido como a inteligência artificial pode ser uma ferramenta crucial para enfrentar os desafios energéticos contemporâneos, contribuindo para



um desenvolvimento sustentável que respeite os limites ambientais e promova o bem-estar global.

## 2.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E ENERGIA RENOVÁVEL

A melhoria da confiabilidade dos sistemas de energia de forma custo-efetiva é cada vez mais importante, especialmente com o aumento do uso de recursos de energia renovável em todo o mundo. A otimização da geração de energia, o planejamento do armazenamento e a previsão da demanda tornaram-se mais desafiadores devido à variabilidade dos sistemas de produção e distribuição. A integração do gerenciamento rápido de oferta e demanda é essencial para proporcionar estabilidade e eficiência na operação da cadeia de valor de energia (Moreno-Leiva *et al.*, 2020).

Com a era digital, uma quantidade significativa de dados sobre produção de energia e padrões de consumo é gerada. Se processados corretamente, essas *big datas* podem informar rapidamente e de forma eficiente as decisões dos gestores. A combinação de inteligência artificial e *big data* permite às empresas desenvolverem ferramentas inteligentes para apoiar decisões em tempo real, especialmente relacionadas à produção, distribuição e conservação de energia, além da operação e manutenção do sistema (Moreno-Leiva *et al.*, 2020).

As principais fontes de energia renovável incluem eólica, solar, hidrelétrica e biomassa. A energia eólica destaca-se pelos menores custos de instalação e eficiência econômica. Algoritmos de aprendizado de máquina, como sistemas adaptativos *neurofuzzy*, redes neurais e reconhecimento de padrões, são usados para criar modelos preditivos de geração de energia eólica em diversas escalas temporais: curto, médio e longo prazo. A aplicação adequada de técnicas em cada escala é essencial para a otimização, controle e modelagem de turbinas eólicas. Previsões precisas da geração de energia são fundamentais para o gerenciamento eficiente do sistema de energia, controle de carga das turbinas, comércio de energia e monitoramento dos sistemas energéticos. (Çolak; Kaya, 2017).

Ao lado da demanda energética, a inteligência artificial pode ser usada para identificar consumidores conservadores, aprender seus atributos e preferências e desenvolver estratégias para motivar a mudança de comportamento para maior eficiência energética. Por exemplo, as



redes neurais artificiais (ANNs) são comumente usadas para prever preços de energia e liderar a curto prazo. Além disso, o *machine learning* não supervisionado é principalmente usado para prever padrões de consumo e agrupar consumidores para que esquemas direcionados de recompensa e penalidade possam ser projetados e implementados (Ferraz Junior, 2023).

Os setores residenciais e comerciais representam cerca de 34,7% do consumo global de energia. Estudos indicam que o *machine learning* pode prever a demanda de energia de forma eficaz. No Irã, o uso de tecnologias de machine learning, incluindo regressão linear múltipla, regressão linear múltipla logarítmica e redes neurais artificiais autorregressivas não lineares com entrada exógena, teve sucesso na previsão do consumo de energia. Na China, previsões precisas de falhas corporativas no setor de energia têm impulsionado melhorias na geração de energia estatal e investimentos sustentáveis. Discussões com o setor de energia chinês resultaram na proposta de um novo modelo integrado (NIM) para a previsão de falhas corporativas, utilizando inteligência artificial e ferramentas de *machine learning* (Mhlanga, 2023).

A inteligência artificial tem impactado significativamente as políticas de energias renováveis, modelando cenários, analisando políticas e prevendo impactos econômicos. Suas aplicações incluem o monitoramento de ecossistemas, medição da pegada de carbono e otimização do gerenciamento de recursos, promovendo sustentabilidade e minimizando danos ambientais. Além disso, a inteligência artificial pode facilitar o acesso a energia limpa para comunidades marginalizadas, destacando tecnologias renováveis promissoras (Bennagi *et al.*, 2024).

Na próxima seção, será discutida a aplicação da inteligência artificial no setor energético, explorando como ela transforma a produção, distribuição e gestão de energia, contribuindo para a eficiência energética e a transição para fontes renováveis, com análise de estudos de caso e desafios dessas tecnologias.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Neste estudo, foi realizada uma revisão de literatura, um processo de busca, análise e descrição de um campo específico do conhecimento para melhor delimitação da pesquisa. O termo "literatura" abrange diversos materiais sobre a temática, incluindo artigos científicos,



livros, trabalhos completos publicados em eventos acadêmicos, artigos de jornais, registros históricos, monografias, teses, dissertações e relatórios governamentais. (Flor *et al.*, 2021).

A escolha pela revisão de literatura foi motivada pela necessidade de obter uma visão abrangente e atualizada sobre a aplicação da inteligência artificial na otimização da eficiência e gestão dos sistemas energéticos renováveis. Para fundamentar as conclusões em evidências robustas, foi adotada uma abordagem que combina revisão bibliográfica e análise de dados secundários obtidos de fontes relevantes. Isso permite explorar de forma abrangente os impactos potenciais da inteligência artificial na redução de custos operacionais e na maximização da produção de energia sustentável.

Assim, o objetivo geral do presente estudo é investigar como a aplicação de técnicas de inteligência artificial pode otimizar a eficiência e a gestão dos sistemas energéticos renováveis. Especificamente, busca-se compreender como a inteligência artificial contribui para a redução de custos operacionais e a maximização da produção de energia sustentável. A partir de uma revisão abrangente da literatura e da análise de dados secundários relevantes, pretende-se explorar os impactos potenciais e os desafios associados ao uso da inteligência artificial no setor de energia renovável.

Na primeira etapa da pesquisa, foi realizada uma busca nas principais bases de dados, como Scielo, Google Acadêmico e Banco de Teses da Capes, além de livros, periódicos e relatórios de pesquisa. O objetivo foi identificar trabalhos que discutem a aplicação da inteligência artificial no setor de energia renovável. Esse processo permitiu entender os conceitos de inteligência artificial, aprendizado de máquina, suas técnicas principais, desafios, benefícios e impactos na eficiência e gestão dos sistemas energéticos renováveis. A revisão bibliográfica também proporcionou uma visão abrangente da evolução tecnológica e sua aplicação na transição para uma matriz energética sustentável.

Na segunda etapa, foram analisadas aplicações práticas da inteligência artificial em sistemas de energia renovável, avaliando seus impactos e benefícios na gestão energética, bem como os desafios e oportunidades na implementação dessas tecnologias no setor. O objetivo foi responder à pergunta de pesquisa: "Como a aplicação de técnicas de inteligência artificial pode otimizar a eficiência e a gestão de sistemas energéticos renováveis, contribuindo para a redução de custos operacionais e a maximização da produção de energia sustentável?"



Sendo assim, a análise desses dados teve como objetivo avaliar como as técnicas de inteligência artificial podem ser utilizadas para otimizar a eficiência e a gestão de sistemas energéticos renováveis. Ao realizar essa análise, foi possível avaliar e interpretar as informações coletadas durante a revisão bibliográfica e a análise de dados secundários, proporcionando uma compreensão mais abrangente e detalhada do cenário atual e das perspectivas futuras para a aplicação da inteligência artificial na gestão de energia renovável.

#### **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

A constante expansão da tecnologia de energia renovável tornou sua aplicação essencial, especialmente com o advento de sistemas inteligentes baseados em inteligência artificial para enfrentar oportunidades e desafios crescentes, como a gestão de energia, sistemas fotovoltaicos solares, preservação e controle. O uso de sistemas de energias renováveis também aumentou e avançou significativamente (Yang *et al.*, 2024).

A inteligência artificial desempenha um papel crucial na otimização das energias renováveis, abrangendo a previsão de radiação solar, consumo de energia em sistemas solares, velocidade do vento, modelagem de energia eólica e solar, cargas de aquecimento de edifícios, previsão de energia elétrica de longo e curto prazo, modelagem de aquecedores de ambiente, dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e previsão de carga elétrica. Com a integração da inteligência artificial e da Internet das Coisas (IoT), os sistemas de energia renovável estão se tornando mais avançados, robustos e responsivos (Yang *et al.*, 2024).

Pesquisas demonstraram que o uso de inteligência artificial em sistemas de energias renováveis aumentou a relação custo-benefício e a eficiência de tecnologias como turbinas eólicas e painéis solares, tornando-os mais amplamente utilizados e possivelmente levando à eliminação de usinas de energia baseadas em combustíveis fósseis. (Yang *et al.*, 2024).

Nesse sentido, a inteligência artificial também pode auxiliar na manutenção preditiva da infraestrutura energética, reduzindo os tempos de inatividade e assegurando um fornecimento constante de energia. As principais aplicações da inteligência artificial na energia renovável são design, otimização, gestão, estimativa, distribuição e formulação de políticas. O foco está em cinco tecnologias de energias renováveis amplamente utilizadas, a saber, energia solar, tecnologias, microrredes solares e operação de turbinas eólicas (Moreno-Leiva *et al.*, 2020).



Nessa linha de raciocínio, sistemas de simulação baseados em inteligência artificial têm documentado diversas vantagens, incluindo a capacidade de substituir abordagens tradicionais de modelagem física na simulação de energia solar. Essas simulações oferecem soluções econômicas e robustas para questões multivariáveis, sem necessidade de trabalho computacional excessivo e sem exigir conhecimento dos parâmetros internos do sistema (Bennagi *et al.*, 2024).

Além disso, algoritmos de inteligência artificial e análises de dados avançadas permitem a medição precisa de parâmetros que afetam a eficiência dos painéis solares, como temperatura, intensidade da luz e sombreamento. Esses algoritmos ajustam dinamicamente as condições operacionais dos painéis em tempo real, melhorando a estabilidade e a confiabilidade dos sistemas de energia solar. Previsões confiáveis de irradiância solar são essenciais para a gestão eficaz da energia e a integração à rede. A inteligência artificial revolucionou a previsão e avaliação de recursos solares, utilizando dados históricos e meteorológicos para fornecer estimativas precisas de irradiância de curto e longo prazo, melhorando a estabilidade e a produção de energia (Bennagi *et al.*, 2024).

Ainda, algoritmos de aprendizado de máquina podem prever o desempenho de novos designs de células solares, orientando os pesquisadores para combinações mais eficazes ao analisar estatísticas históricas sobre materiais, medições de eficiência e arranjos de design. A inteligência artificial otimiza células solares ao processar grandes volumes de dados, identificando associações complexas, tendências e padrões que as técnicas convencionais não detectam facilmente. Suas principais aplicações incluem a melhoria do desempenho dos painéis solares, a identificação das variáveis que afetam a eficiência das células solares e a previsão do desempenho de novos designs de células solares (Bennagi *et al.*, 2024).

Ademais, na energia eólica, cientistas e engenheiros aplicaram com sucesso algoritmos e modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina para prever, monitorar e controlar turbinas eólicas. Na energia geotérmica, abordagens e modelos de inteligência artificial têm mostrado aplicação promissora para enfrentar desafios, utilizando dados de superfície e subsuperfície para análise de potencial geotérmico. Além disso, as técnicas de inteligência artificial são utilizadas na simulação, controle, tomada de decisão e otimização dos sistemas de energias renováveis (Taghikhah *et al.*, 2022).



Ao lado da demanda de energia, a inteligência artificial (IA) também pode ser usada para identificar consumidores conservadores de energia, aprender seus atributos e preferências e desenvolver estratégias para motivar mudanças de comportamento para maior eficiência energética. Diversos pesquisadores revisaram técnicas de inteligência artificial para categorizar clientes e prever seu consumo. Por exemplo, redes neurais artificiais (ANNs) são comumente usadas para prever preços e demanda de energia no curto prazo. O aprendizado de máquina não supervisionado é geralmente utilizado para prever padrões de consumo e agrupar consumidores, permitindo a implementação de esquemas de recompensa e penalidade direcionados (Taghikhah *et al.*, 2022).

O uso de baterias em veículos elétricos e para armazenamento de energia nas redes está aumentando rapidamente em todo o mundo. Recentes desenvolvimentos em métodos de aprendizado de máquina tornaram essas estratégias dominantes na gestão de baterias. Esses métodos são utilizados principalmente para desempenho macroscópico, incluindo estimativa do estado da bateria, previsão de vida útil, modos de armazenamento, detecção de falhas, balanceamento de células e gestão eficiente térmica e de carga. Por exemplo, técnicas de aprendizado de máquina são aplicadas para prever a vida útil das baterias, detectar falhas precoces e otimizar o balanceamento das células, além de melhorar a eficiência térmica e de carga (Bennagi *et al.*, 2024).

Contudo, apesar da recente utilização da inteligência artificial em estudos de produção de baterias, há espaço para melhorias, uma vez que métodos de mineração de dados e técnicas de reconhecimento de imagem também podem identificar defeitos na cadeia de suprimento de baterias, pois embora diferentes tipos de técnicas de inteligência artificial em gestão de energia renovável tenham sido aplicados, mais estudos experimentais precisam ser conduzidos para detectar e validar as soluções ideais em testes de vida real, permitindo que as técnicas de inteligência artificial e *machine learning* se tornem predominantes no setor de energia.

Logo, embora a inteligência artificial seja uma tecnologia promissora e poderosa que pode ser aproveitada nos esforços para alcançar a sustentabilidade socioambiental, o uso crescente de tecnologias de inteligência artificial em processos organizacionais e práticas humanas enfrenta alguns desafios. Ao utilizar tecnologias de inteligência artificial, questões



éticas como responsabilidade, prestação de contas e responsabilidade legal, bem como precisão, privacidade e acessibilidade dos dados, devem ser consideradas (Taghikhah *et al.*, 2022).

A precisão, autenticidade e exatidão das previsões geradas por modelos e técnicas baseadas em inteligência artificial, que se baseiam em padrões presentes em conjuntos de dados históricos, têm sido questionadas em diversos contextos. Em sistemas climáticos altamente dinâmicos, as previsões podem apresentar imprecisões devido à ausência de dados relacionados aos efeitos climáticos antropogênicos, que estão em constante evolução e apresentam questões de compensação entre variância e viés. As técnicas de aprendizado profundo e redes neurais, que simulam o processo de tomada de decisão humano, são limitadas na exploração de relações entre variáveis. Além disso, ao combinar conjuntos de dados coletados de múltiplas fontes e analisar grandes volumes de dados, as abordagens de inteligência artificial levantam potenciais problemas de privacidade e podem aumentar as chances de ameaças à cibersegurança e riscos à confidencialidade dos dados. (Taghikhah *et al.*, 2022).

Sendo assim, as técnicas de IA podem resultar em consequências adversas não intencionais, como a utilização de grandes conjuntos de dados e a operação de grandes centros de dados que produzem uma considerável pegada de carbono. Um desafio adicional no desenvolvimento de modelos preditivos é a necessidade de um banco de dados padronizado para testar adequadamente os modelos. Este banco de dados deve abranger todos os diferentes tipos de dados, garantindo uma avaliação abrangente e precisa dos modelos desenvolvidos.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A crescente demanda por energia, impulsionada pelo crescimento populacional, urbanização e desenvolvimento econômico, representa um desafio significativo para a sustentabilidade global. A transição para uma matriz energética de baixo carbono é essencial para mitigar os impactos adversos das fontes de energia não renováveis, como o esgotamento dos recursos e as mudanças climáticas. Nesse contexto, a inteligência artificial emerge como uma ferramenta crucial para otimizar a eficiência e a gestão dos sistemas energéticos renováveis.

A aplicação de técnicas avançadas de inteligência artificial mostrou-se promissora em várias áreas dos sistemas energéticos renováveis. Desde a previsão de geração de energia eólica e solar até a otimização do armazenamento de energia e gestão de redes inteligentes, a



inteligência artificial oferece soluções que melhoram a confiabilidade operacional e reduzem os custos operacionais. Além disso, facilita a integração de tecnologias emergentes, como veículos elétricos e microrredes solares, contribuindo para uma maior resiliência e sustentabilidade do sistema energético.

Entretanto, o uso generalizado de inteligência artificial apresenta desafios. Questões éticas, como privacidade de dados e responsabilidade por decisões automatizadas, exigem uma abordagem cuidadosa para garantir que essas tecnologias sejam implementadas de forma ética e transparente. Além disso, o consumo de energia associado ao treinamento de modelos de inteligência artificial e à operação de infraestrutura computacional representa um desafio para a sustentabilidade ambiental, exigindo inovações adicionais em eficiência energética e mitigação da pegada de carbono.

A pesquisa destaca que a aplicação de técnicas de inteligência artificial pode otimizar a eficiência e a gestão de sistemas energéticos renováveis ao proporcionar melhorias na previsão de geração e demanda de energia, otimização de processos operacionais e manutenção preditiva. Essas inovações contribuem diretamente para a redução de custos operacionais e a maximização da produção de energia sustentável, promovendo um uso mais eficaz dos recursos energéticos e apoiando a transição para uma matriz energética mais verde e eficiente.

Portanto, embora a inteligência artificial ofereça oportunidades significativas para transformar positivamente o setor de energia renovável, seu desenvolvimento e aplicação devem ser acompanhados por políticas regulatórias robustas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento sustentável e um compromisso contínuo com práticas responsáveis. A colaboração entre governos, indústrias e comunidades acadêmicas é essencial para aproveitar todo o potencial da inteligência artificial na transição para um futuro energético sustentável e resiliente.

## REFERÊNCIAS

ABDALLA, Ahmed N.; NAZIR, Muhammad Shahzad; TAO, Hai; CAO, Suqun; JI, Rendong; JIANG, Mingxin; YAO, Liu. Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. **Journal of Energy Storage**, [s.l.], v. 40, p. 102811, ago. 2021

BARBALHO, Carlos Augusto de Souza. **Tributação e meio ambiente: uma análise das normas tributárias indutoras como meio para concretização do estado socioambiental de**



**direito.** Projeto de pesquisa apresentado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica para fins de seleção para o CNPQ/PIBIC. Natal. 2015.

BENNAGI, Aseel; ALHOUSRYA, Obaida; COTFAS, Daniel T.; COTFAS, Petru A. Comprehensive study of the artificial intelligence applied in renewable energy. **Energy Strategy Reviews**, 2024, v. 54, p. 101446. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/280851/1-s2.0-S2211467X23X00054/1-s2.0-S2211467X24001536/main.pdf>. Acesso em: 26 de junho de 2024.

BRANDT, Daniel Batista. O direito à cidade em Henri Lefebvre e David Harvey: da utopia urbana experimental à gestão democrática das cidades. **Anais do 16º Encontro Nacional de Pesquisadores em Serviço Social**, 2019.

BRASIL. **Constituição federal de 1988.** Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Constituicao/ConstituicaoCompilado.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/ConstituicaoCompilado.htm). Acesso em 01 jul. 2024.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001.** Regula os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/110257.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm). Acesso em: 01 jul. 2024.

ÇOLAK, Murat; KAYA, İhsan. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. **Energy**, [s.l.], 2017.

DIAS, Gilka da Mata. **Cidade Sustentável.** Natal: do Autor, 2009.

FERRAZ JUNIOR. **Série Energia:** Inteligência artificial invade setor elétrico com perspectivas de ganho financeiro e ambiental. *Jornal da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto*, 12 de junho de 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-inteligencia-artificial-invade-setor-eletrico-com-perspectivas-de-ganho-financeiro-e-ambiental/>. Acesso em: 6 de abril de 2024

FLOR, Tainá de Oliveira; GONÇALVES, Antônio José da Silva; JÚNIOR, Airton José Vinholi; TRAJANO, Valéria da Silva. Revisões de literatura como métodos de pesquisa: aproximações e divergências. **Anais do VI CONAPESC.** Campina Grande: Realize Editora, 2021. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/76913>. Acesso em: 21 jul. 2023.

MHLANGA, David. Artificial Intelligence and Machine Learning for Energy Consumption and Production in Emerging Markets: A Review. **Energies**, v. 16, n. 2, p. 745, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16020745>. Acesso em: 1 jul. 2024.



MORENO-LEIVA, Simón; HAAS, Jannik; JUNNE, Tobias; VALENCIA, Felipe; GODIN, Hélène; KRACHT, Willy; NOWAK, Wolfgang; ELTROP, Ludger. Renewable energy in copper production: A review on systems design and methodological approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, p. 118978, 10 fev. 2020.

OLIVEIRA FILHO, João Glicério de. **A hierarquização dos princípios da ordem econômica na Constituição brasileira de 1988**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Direito, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SILVA, José Afonso da. **Direito Ambiental Constitucional**. 6 ed. São Paulo. Malheiros, 2007.

SILVA, Marcos Antônio da. Tecnologias Disruptivas e Inteligência Artificial: Impulsionando a Agenda dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). **Revista Acadêmica da Lusofonia**, v. 1, n. 1, p. 10-22, 2024. Disponível em: <https://revistaacademicadalusofonia.com/index.php/lusofonia/article/view/10/22>. Acesso em: 18 jun. 2024.

TAGHIKHAH, Firouzeh; ERFANI, Eila; BAKHSHAYESHI, Ivan; TAYARI, Sara; KARATOPOUZIS, Alexandros; HANNA, Bavly. **Artificial intelligence and sustainability: solutions to social and environmental challenges**. In: Artificial Intelligence and Data Science in Environmental Sensing: Cognitive Data Science in Sustainable Computing. Academic Press, 2022. p. 93-108. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0938767X22000054>. Acesso em: 26 de junho de 2024.

YANG, Senmiao; WANG, Jianda; DONG, Kangyin; DONG, Xiucheng; WANG, Kun; FU, Xiaowen. Is artificial intelligence technology innovation a recipe for low-carbon energy transition? A global perspective. **Energy**, v. 300, 1 ago. 2024, p. 131539. Disponível em: <https://www.elsevier.com/locate/energy>. Acesso em: 26 de junho de 2024.