

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SUSTENTABILIDADE: DESAFIOS REGULATÓRIOS E IMPACTO AMBIENTAL

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND SUSTAINABILITY: REGULATORY CHALLENGES AND ENVIRONMENTAL IMPACT

PAULO JOSÉ PEREIRA CARNEIRO TORRES DA SILVA *

WILSON TADEU DE CARVALHO ECCARD **

JAMILE SABBAD CARECHO CAVALCANTE ***

RESUMO

O avanço da inteligência artificial (IA) tem impulsionado inovações em diversos setores, mas também gera preocupações ambientais significativas, especialmente devido ao alto consumo energético e hídrico de *data centers*. Este artigo analisa o impacto ambiental da IA, explorando o aumento do consumo de energia e água, as emissões de carbono e os desafios regulatórios enfrentados globalmente. A pesquisa é baseada em uma revisão de literatura e relatórios oficiais, comparando iniciativas de mitigação adotadas por diferentes países, como União Europeia, Estados Unidos e China. O estudo enfatiza a necessidade de políticas públicas e avanços tecnológicos voltados para a sustentabilidade, destacando soluções como IA de baixo consumo energético, fontes renováveis e métodos eficientes de resfriamento de servidores. Conclui-se que a transição para uma IA sustentável requer esforços coordenados entre governos, setor privado e co-

ABSTRACT

The advancement of artificial intelligence (AI) has driven innovations across various sectors but also raises significant environmental concerns, particularly due to the high energy and water consumption of data centers. This article examines AI's environmental impact by analyzing rising energy and water consumption, carbon emissions, and global regulatory challenges. The research is based on a literature review and official reports, comparing mitigation initiatives adopted by different countries, such as the European Union, the United States, and China. The study highlights the need for public policies and technological advances aimed at sustainability, emphasizing solutions such as low-energy AI, renewable energy sources, and efficient server cooling methods. It concludes that the transition to sustainable AI requires coordinated efforts between governments, the private sector, and the academic community to

* Docente do Programa de Mestrado e Doutorado em Direito da Universidade Estácio de Sá. Doutor em Direito Público pela UNESA/RJ na linha de Acesso à Justiça (2021). Mestre em Direito Constitucional pelo Programa de Pós Graduação em Direito Constitucional – PPGDC/UFF (2017).

E-mail: paulo.ctorres@estacio.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4556-3443>.

** Doutor em Direito pelo Programa de Pós-graduação em Direito, Instituições e Negócios da Universidade Federal Fluminense - PPGDIN/UFF. Mestre em Direito Constitucional pelo Programa de Pós-graduação em Direito Constitucional da Universidade Federal Fluminense - PPGDC/UFF. Professor da graduação na Universidade Estácio de Sá.

E-mail: carecard@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9766-2259>.

*** Doutoranda em Teoria do Estado e Direito Constitucional pela Puc-Rio bolsa Prosup/CAPES. Mestre em Direito Público na linha de Pesquisa Direitos Fundamentais e Novos Direitos na UNESA/RJ, com bolsa Prosup/CAPES (2023).

E-mail: jamilesabbad@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9696-7529>.

munidade acadêmica para minimizar impactos ambientais e garantir um desenvolvimento tecnológico responsável.

PALAVRAS-CHAVE: Inteligência artificial. Impacto ambiental. Sustentabilidade. *Data centers.*

minimize environmental impacts and ensure responsible technological development.

KEYWORDS: Artificial intelligence. Environmental impact. Sustainability. *Data centers.*

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a aplicação da inteligência artificial (IA) têm avançado de forma exponencial nas últimas décadas, acarretando impactos ambientais cada vez mais relevantes. Em especial, destaca-se o elevado consumo de energia e água necessário para o treinamento e funcionamento de sistemas baseados em grandes volumes de dados. Esta pesquisa parte da análise da evolução tecnológica da IA, com ênfase nos recentes avanços em aprendizado profundo, para então examinar os efeitos ambientais associados ao seu crescimento — sobretudo o papel dos *data centers* como principais consumidores de recursos naturais.

A presente pesquisa busca avaliar estudos recentes sobre o consumo energético desses centros de processamento de dados e os comparar com o impacto ambiental de outras indústrias tecnológicas. A partir desses dados, foi possível identificar os principais desafios enfrentados pelos sistemas de IA em termos de sustentabilidade, especialmente o aumento nas emissões de dióxido de carbono e a pressão sobre os recursos hídricos para resfriamento de *data centers*.

Metodologicamente este artigo foi elaborado a partir de uma revisão de literatura de natureza qualitativa, com foco em publicações científicas, relatórios de organizações internacionais e estudos de impacto ambiental relacionados ao uso de tecnologias de inteligência artificial. As fontes selecionadas incluem artigos de periódicos revisados por pares, como *Environmental Research Letters* e *Nature Energy*, além de relatórios de órgãos reguladores como a Agência Internacional de Energia (AIE) e a União Europeia, que abordam diretamente o impacto energético e hídrico de *data centers* e tecnologias digitais. A pesquisa também incluiu uma análise comparativa das iniciativas regulatórias e políticas de mitigação ambiental adotadas em diferentes regiões do mundo, com especial atenção à União Europeia, Estados Unidos e China. Os dados foram obtidos por meio de plataformas de acesso acadêmico como *Google Scholar*, *Scopus* e bases de dados institucionais, assegurando a relevância e confiabilidade das informações.

Além disso, o estudo investigou políticas e iniciativas internacionais voltadas para a mitigação dos impactos ambientais da IA. A pesquisa comparou as estratégias adotadas por diferentes países e blocos econômicos, com foco na União Europeia, que lançou o “Pacto Verde Europeu” como parte de sua estratégia de digitalização sustentável, e nos Estados Unidos e China, que também buscam soluções para equilibrar o crescimento tecnológico com a sustentabilidade.

dade. Essas comparações permitiram traçar um panorama das políticas públicas e práticas regulatórias mais avançadas para enfrentar esses desafios.

Por fim, a pesquisa considerou as perspectivas futuras para a IA explorando como a demanda crescente por essa tecnologia poderá influenciar o consumo de energia global e os impactos ambientais associados, bem como as possíveis soluções em desenvolvimento, como IA de baixa energia e sistemas de resfriamento mais eficientes. O estudo conclui com uma análise crítica sobre a necessidade de uma colaboração internacional mais eficaz para mitigar os impactos ambientais e garantir um futuro mais sustentável para essa tecnologia.

1. A ASCENSÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A INTENSIFICAÇÃO DO CONSUMO DE RECURSOS NATURAIS

Nos últimos anos, a inteligência artificial (IA) passou de uma área de pesquisa restrita para um fenômeno de massa, com aplicações em diversos setores da economia, desde a saúde até os transportes, passando pela educação e o entretenimento. Essa rápida ascensão resultou em uma explosão na demanda por tecnologias de IA, especialmente por causa de seu impacto transformador em áreas como o reconhecimento de imagem, processamento de linguagem natural e sistemas de recomendação. Este crescimento exponencial foi impulsionado por uma combinação de fatores: o aumento da capacidade computacional, a disponibilidade de grandes volumes de dados e os avanços contínuos nos algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente em aprendizado profundo.

A demanda por sistemas inteligentes começou a crescer substancialmente a partir do início dos anos 2010, com o sucesso de grandes empresas de tecnologia que empregaram IA para resolver problemas práticos em escala industrial. Empresas como Google, Amazon e Facebook adotaram amplamente redes neurais profundas para tarefas como personalização de conteúdo, publicidade direcionada e otimização de processos logísticos¹. A implementação de algoritmos de aprendizado de máquina nessas áreas resultou em ganhos de eficiência significativos, aumentando a produtividade e a lucratividade dessas empresas, ao mesmo tempo que criava uma corrida tecnológica entre corporações para adotar e melhorar suas próprias soluções baseadas em IA.

Além disso, a crescente popularização de assistentes virtuais, como *Siri*, *Alexa* e *Google Assistant*, também ajudou a disseminar o uso da tecnologia entre os consumidores. Esses sistemas inteligentes baseados em reconhecimento de voz e processamento de linguagem natural permitiram que a IA se tornasse parte do cotidiano de milhões de pessoas em todo o mundo². Isso resultou em uma explosão de demanda por processamento de IA, à medida que mais dispositivos

1 HALEVI *et al.*, 2017, p. 234

2 *Ibid.*, p. 237.

começaram a se conectar à Internet e a depender de redes neurais profundas para fornecer resultados rápidos e personalizados.

No setor de transportes, a aplicação de IA para o desenvolvimento de veículos autônomos também contribuiu significativamente para o aumento da demanda. Empresas como Tesla, Waymo e Uber investiram pesadamente em algoritmos de aprendizado de máquina para criar carros que pudessem operar de forma autônoma, o que exigiu enormes quantidades de dados e processamento computacional para treinar os sistemas de visão computacional e tomada de decisão necessários para esses veículos³. Isso resultou em um aumento na demanda por infraestrutura de *data centers*⁴ e processamento em nuvem, a fim de fornecer o poder de computação necessário para treinar e executar esses sistemas em tempo real.

Outra área que experimentou um crescimento significativo no uso da tecnologia foi o setor financeiro. Instituições financeiras têm utilizado algoritmos de aprendizado de máquina para detectar fraudes, prever flutuações de mercado e automatizar decisões de crédito⁵. Esses sistemas são capazes de processar grandes volumes de dados financeiros em alta velocidade, fornecendo *insights* mais precisos do que os métodos tradicionais. A IA também tem sido empregada em algoritmos de negociação de alta frequência, onde sistemas automatizados realizam negociações em frações de segundo, com base em análises complexas de dados de mercado, o que criou uma demanda crescente por soluções tecnológicas mais avançadas devido a alta concorrência.

Esse crescimento da demanda por IA foi facilitado pela crescente disponibilidade de grandes volumes de dados, impulsionada pela era digital e a expansão das tecnologias da informação. O uso de *big data*, que permite a coleta e análise de quantidades massivas de informações em tempo real, tornou-se essencial para o sucesso da IA moderna. Empresas e governos começaram a armazenar e processar esses dados em escala sem precedentes, utilizando-os em sistemas de IA para analisar padrões, prever tendências e otimizar processos. Como apontado por Goodfellow, Bengio e Courville⁶ “a disponibilidade de dados em larga escala, combinada com o aumento do poder computacional, criou as condições ideais para a explosão de tecnologias de aprendizado profundo”.

Além das aplicações empresariais, o setor de pesquisa também foi transformado pela demanda crescente por IA. Universidades, centros de pesquisa

3 GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016, p. 287.

4 “Um datacenter corresponde a um local físico que armazena máquinas de computação e seus equipamentos de hardware relacionados. Ele contém a infraestrutura de computação que os sistemas de TI exigem, como servidores, unidades de armazenamento de dados e equipamentos de rede. É a instalação física que armazena os dados digitais de qualquer empresa”. (AWS, 2024.)

5 AGGARWAL, 2018, p. 115.

6 GOODFELLOW, BENGIO, COURVILLE, 2016, p. 301.

e laboratórios começaram a explorar o potencial da IA em várias disciplinas, desde a medicina, para análise de imagens médicas e diagnóstico precoce de doenças, até a biotecnologia, para prever interações moleculares e desenvolver novos medicamentos⁷. Isso gerou um ciclo virtuoso de inovação, no qual avanços em *hardware* e *software* levaram a novas descobertas científicas, que, por sua vez, aumentaram a demanda por mais poder computacional e desenvolvimento tecnológico.

No entanto, essa explosão da demanda por IA também trouxe desafios significativos, especialmente em termos de consumo de recursos energéticos. O treinamento de modelos de IA, particularmente os de aprendizado profundo com bilhões de parâmetros, requer uma quantidade substancial de poder computacional. De acordo com um estudo da Universidade de Massachusetts, o treinamento de grandes modelos de IA pode resultar em emissões de carbono comparáveis ao uso de cinco carros ao longo de sua vida útil⁸. Contribuindo com as preocupações sobre o impacto ambiental da tecnologia, especialmente à medida que ela continua a se expandir em escala.

Por fim, o uso crescente da tecnologia em áreas como segurança pública e vigilância também contribuiu para o aumento da demanda por sistemas computacionais poderosos. Governos e agências de segurança começaram a adotar algoritmos de aprendizado profundo para tarefas como reconhecimento facial, análise de vídeo em tempo real e detecção de padrões suspeitos em grandes volumes de dados. Essas aplicações, embora eficazes em muitos casos, também exigem enormes quantidades de dados e poder computacional, o que aumenta ainda mais a pressão sobre os recursos energéticos globais⁹.

Diante desse cenário, resta claro que o desenvolvimento da tecnologia, apesar de suas imensas vantagens, também traz consigo desafios críticos em termos de sustentabilidade. À medida que a sua expansão continua, será necessário equilibrar os avanços tecnológicos com soluções sustentáveis para mitigar o seu impacto ambiental.

2. O CONSUMO ENERGÉTICO E HÍDRICO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O consumo energético associado à inteligência artificial (IA) tem se tornado uma preocupação crescente à medida que a demanda por poder computacional aumenta de forma exponencial. Os sistemas de IA, especialmente os modelos de aprendizado profundo (*deep learning*), dependem de infraestruturas robustas de computação, conhecidas como *data centers*, para processar os enor-

7 ESTRADA *et al.*, 2020, p. 55.

8 STRUBELL *et al.*, 2019, p. 5.

9 ROSEBROCK, 2019, p. 152.

mes volumes de dados necessários para o treinamento e operação de seus algoritmos. Esses *data centers*, por sua vez, consomem grandes quantidades de eletricidade, o que contribui significativamente para o consumo global de energia.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), o consumo global de eletricidade dos *data centers* em 2020 foi estimado em aproximadamente 200 TWh, o que representava cerca de 1% de todo o consumo de eletricidade mundial¹⁰. Embora esse número possa parecer pequeno em termos percentuais, ele reflete um consumo energético considerável, equivalente ao uso de eletricidade de países de médio porte, como a Argentina. Além disso, estima-se que o consumo de eletricidade dos *data centers* poderá triplicar até 2030, em resposta ao aumento da demanda por IA e outras tecnologias digitais¹¹.

Um dos principais fatores que contribuem para o alto consumo energético dos sistemas de IA é o treinamento de modelos de aprendizado profundo. Modelos complexos, como os utilizados para processamento de linguagem natural, reconhecimento de imagem e redes neurais convolucionais (CNNs), requerem inúmeras iterações e ajustes de parâmetros, o que exige um grande poder computacional. Um exemplo notável é o modelo GPT-3, desenvolvido pela OpenAI, que possui 175 bilhões de parâmetros e exigiu um consumo de 1,287 MWh de eletricidade para seu treinamento completo¹², com o uso de grandes *data centers* 24 horas por dia e sistemas de resfriamento intensivos. Para colocar esse número em perspectiva, essa quantidade de energia é equivalente ao consumo anual de cerca de 120 residências nos Estados Unidos.

Além do impacto ambiental direto, o consumo energético associado aos sistemas de IA também depende fortemente da matriz energética de cada região. Em locais onde a geração de eletricidade ainda é baseada em fontes de energia não renováveis, como carvão e gás natural, o impacto ambiental é ainda mais significativo. Um estudo conduzido por Strubell, *et al.*,¹³ revelou que o treinamento de um grande modelo de processamento de linguagem natural (NLP) pode gerar mais de 284 toneladas de CO₂, o equivalente às emissões de cinco automóveis ao longo de sua vida útil¹⁴. Essa elevada pegada de carbono está diretamente associada ao uso de energia proveniente de fontes fósseis em *data centers*.

Outro fator relevante para o aumento do consumo energético dos sistemas de IA é a proliferação de inferências em tempo real, que exigem que os modelos sejam constantemente executados em grandes servidores. Ao contrário do processo de treinamento, que é executado uma vez ou periodicamente, as inferências acontecem a todo momento, sempre que um usuário interage com um

10 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2020, p. 5.

11 *Ibid.*, p. 6.

12 OPENAI, 2020, p. 32.

13 STRUBELL, *et al.*, 2019.

14 *Ibid.*, p. 5.

sistema de IA, como assistentes virtuais, sistemas de recomendação ou serviços de tradução automática¹⁵.

Além disso, a corrida tecnológica entre grandes empresas de tecnologia, como Google, Amazon, Microsoft e Facebook, também tem impulsionado o aumento do consumo de energia. Essas empresas estão constantemente competindo para desenvolver modelos de IA mais avançados e poderosos, o que requer infraestruturas cada vez mais robustas e *data centers* de maior escala. Por exemplo, em 2018, o Google anunciou que seus *data centers* consumiram 10,6 TWh de eletricidade, um aumento de 13% em relação ao ano anterior¹⁶. Esses números refletem não apenas o crescimento da IA, mas também o aumento da dependência de tecnologias em nuvem, que exigem um uso contínuo de energia.

Em resposta a essa crescente demanda por energia, algumas empresas de tecnologia e governos começaram a adotar medidas para mitigar o impacto ambiental dos *data centers*. O uso de energia renovável, como solar e eólica, tem se tornado cada vez mais comum em grandes centros de dados, especialmente na Europa e nos Estados Unidos, como parte de iniciativas para reduzir a pegada de carbono. No entanto, apesar desses esforços, a eficiência energética dos *data centers* ainda é um desafio contínuo, e há uma necessidade urgente de inovar tanto em termos de *hardware* quanto de *software* para tornar o consumo de energia mais sustentável¹⁷.

Além do consumo energético, o impacto ambiental dos sistemas de inteligência artificial (IA) também está relacionado ao consumo hídrico, especialmente em *data centers*. À medida que os servidores realizam o processamento intensivo de dados necessário para o treinamento e a execução de modelos de aprendizado profundo, grandes quantidades de calor são geradas. Esse calor precisa ser dissipado para manter os servidores operando de maneira eficiente e evitar danos aos equipamentos. A forma mais comum de dissipar o calor é através de sistemas de resfriamento que, em muitos casos, utilizam água como principal meio de refrigeração. Em muitas regiões, isso se traduz em um consumo adicional de energia, pesquisas indicam que cerca de 40% do consumo total de energia dos *data centers* é destinado apenas para resfriamento¹⁸.

O uso de água em *data centers* é especialmente significativo em regiões onde a escassez de água já é um problema. Um estudo da Universidade de Berkeley revelou que *data centers* em regiões áridas, como o oeste dos Estados Unidos, consomem milhões de litros de água anualmente para manter os servidores resfriados¹⁹. Segundo o relatório, o consumo hídrico dos *data centers* nos Estados Unidos em 2020 foi estimado em 660 bilhões de litros de água, sendo que

15 Halevi, et. al., 2017, p. 239.

16 GOOGLE, 2019, p. 12.

17 MALLICK *et al.*, 2021, p. 112.

18 MASANET *et al.*, 2020, p. 34.

19 Ibid., p. 34.

boa parte desse volume foi utilizada em processos de resfriamento. A tendência, segundo o estudo, é de aumento, uma vez que a demanda por infraestrutura de IA continua a crescer exponencialmente²⁰.

Em regiões como a Califórnia, onde as secas são frequentes e os recursos hídricos já são escassos, o uso intensivo de água para resfriamento de *data centers* tem gerado preocupações. De acordo com um relatório da *Pacific Institute*²¹, um único grande *data center* pode consumir até 1,7 milhão de litros de água por dia em regiões de clima seco, dependendo do tipo de sistema de resfriamento utilizado. A pressão sobre os recursos hídricos em regiões como essas tem levado a uma reavaliação das práticas de gestão da água por parte das grandes empresas de tecnologia que operam *data centers*, como a Google, Microsoft e Amazon²².

Os sistemas de resfriamento que dependem de água são, em grande parte, baseados no uso de torres de resfriamento evaporativo, que resfriam a água ao fazê-la evaporar, o que leva a um consumo contínuo de grandes quantidades desse recurso. A alternativa seria o uso de resfriamento a ar, que, embora reduza o consumo hídrico, é menos eficiente em termos de energia, exigindo maior eletricidade para operar. Esse dilema, conhecido como “*trade-off* entre água e energia”, é uma questão crucial na gestão de *data centers*, uma vez que o uso de uma solução mais sustentável em um aspecto pode gerar maior impacto em outro²³.

Além disso, o impacto hídrico de *data centers* não se limita ao resfriamento direto. Muitas instalações utilizam água potável para seus sistemas, exacerbando ainda mais a escassez de água em regiões vulneráveis. Um estudo conduzido pela *International Journal of Water Resources Development*²⁴ apontou que cerca de 15% da água utilizada em *data centers* nos Estados Unidos é água potável, que poderia ser destinada a outros usos prioritários, como consumo humano ou irrigação agrícola²⁵. Esse uso intensivo de água potável levanta questões éticas sobre a sustentabilidade do modelo atual de operação dos *data centers*, especialmente em áreas onde o acesso à água já é um problema social.

Nos últimos anos, algumas empresas de tecnologia começaram a explorar alternativas mais sustentáveis para o resfriamento de seus *data centers*. O *data center* da Google em Douglas County, Geórgia, por exemplo, já utiliza 100% de água reciclada para o resfriamento de seus servidores, uma prática que pode reduzir significativamente o consumo de água potável²⁶. A empresa também está

20 Ibid., p. 35.

21 PACIFIC INSTITUTE, 2022.

22 Ibid., p. 18.

23 MALLICK *et al.*, 2021, p. 117.

24 INTERNATIONAL JOURNAL OF WATER RESOURCES DEVELOPMENT, 2021.

25 SCHMIDT; PETERSON; COOK, 2021, p. 67.

26 GOOGLE, 2021, p. 9.

investindo em soluções de resfriamento com eficiência energética que utilizam ar em regiões mais frias, onde a temperatura ambiente pode ajudar a dissipar o calor de forma mais eficiente sem a necessidade de grandes volumes de água.

Outra inovação promissora são os *data centers* submersos, uma tecnologia que está sendo testada por empresas como Microsoft. Em 2018, a Microsoft lançou o *Project Natick*, um projeto que envolve a implantação de *data centers* em cápsulas submersas no oceano. Esses centros de processamento de dados são resfriados pela água do mar, o que elimina a necessidade de usar água potável ou sistemas de resfriamento a ar que consomem muita eletricidade. O *Project Natick* mostrou resultados promissores, reduzindo o consumo de energia para resfriamento em até 40%²⁷. Essa abordagem não apenas economiza água potável, mas também diminui significativamente o impacto ambiental geral dos *data centers*.

De modo geral, a implementação de tecnologias de resfriamento mais eficientes, o uso de água reciclada e o desenvolvimento de alternativas como *data centers* submersos são passos importantes para mitigar os impactos hídricos, mas o desafio persiste. Com o crescimento contínuo da IA encontrar um equilíbrio entre o consumo de água e a demanda por resfriamento será essencial para garantir que o impacto ambiental das novas tecnologias seja minimizado.

Em suma, o crescimento acelerado da demanda por IA e os requisitos de processamento de grandes modelos de aprendizado profundo colocam uma pressão significativa sobre os recursos energéticos globais. Embora esforços estejam sendo feitos para aumentar a eficiência energética dos *data centers* e promover o uso de fontes renováveis, o impacto ambiental dos sistemas de IA continua a ser uma questão importante que precisa ser abordada por meio de políticas públicas, que incentivem o uso de tecnologias mais sustentáveis, inovações tecnológicas, para redução do impacto ambiental, e regulamentações ambientais que imponha limites ao consumo de recursos naturais²⁸.

2.1 COMPARAÇÕES REGIONAIS E SETORIAIS

O impacto ambiental do consumo energético e hídrico dos sistemas de inteligência artificial (IA) não é uniforme em todo o mundo. Variações regionais no uso de energia, nas fontes de eletricidade e nas políticas ambientais desempenham um papel crucial na determinação da magnitude desses impactos. Além disso, diferentes setores econômicos adotam a IA de maneira desigual, o que resulta em variações significativas no consumo de recursos naturais. Essas comparações regionais e setoriais são essenciais para compreender o impacto global dos sistemas de IA e as medidas necessárias para mitigar suas consequências ambientais.

27 MICROSOFT, 2019, p. 22.

28 Masanet, *et. al.*, 202, p. 37.

Em termos regionais, uma das principais distinções é a fonte de eletricidade usada para alimentar os *data centers* que suportam a IA. Regiões como a Europa, especialmente os países nórdicos, têm se destacado pela adoção de fontes de energia renovável para abastecer seus *data centers*. A Suécia e a Noruega, por exemplo, contam com uma matriz energética predominantemente composta por energia hidrelétrica e eólica, o que reduz significativamente as emissões de carbono associadas ao consumo energético da IA. De acordo com o relatório *Renewable Energy Data Centers* da Agência Internacional de Energia (AIE), cerca de 75% da energia utilizada em data centers na Noruega vem de fontes renováveis, enquanto na Suécia esse número é de 65%²⁹. Essa dependência de energia limpa tem colocado os países nórdicos na vanguarda das operações de *data centers* sustentáveis, atraindo grandes empresas de tecnologia que buscam reduzir sua pegada de carbono.

Por outro lado, regiões que dependem fortemente de fontes de energia não renováveis, como carvão e gás natural, enfrentam um desafio maior em termos de sustentabilidade. Na China, por exemplo, cerca de 60% da eletricidade é gerada a partir do carvão, o que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa associadas à operação de data centers³⁰. Apesar dos esforços do governo chinês para aumentar o uso de energias renováveis e melhorar a eficiência energética dos data centers, o impacto ambiental permanece elevado. A China abriga alguns dos maiores *data centers* do mundo, responsáveis por sustentar a crescente infraestrutura de IA e serviços em nuvem do país, o que amplia ainda mais o consumo de energia proveniente de fontes não renováveis.

Nos Estados Unidos, a situação é mais heterogênea. Embora o país tenha adotado fontes de energia renovável em alguns estados, como Califórnia e Texas, onde a energia solar e eólica são amplamente utilizadas, grande parte da energia consumida por data centers ainda provém de fontes não renováveis. De acordo com o relatório da *U.S. Energy Information Administration* (EIA), em 2021, aproximadamente 40% da eletricidade nos EUA ainda era gerada a partir de gás natural e 20% a partir de carvão³¹. Essa dependência de combustíveis fósseis resulta em uma pegada de carbono significativa para os *data centers* localizados em estados que ainda não transitaram para energias limpas.

Em termos de setores, o impacto ambiental da IA também varia consideravelmente. O setor financeiro, por exemplo, é um dos que mais utilizam a tecnologia em operações como negociação de alta frequência e detecção de fraudes. No entanto, esse setor depende menos de grandes volumes de dados em tempo real quando comparado a setores como a publicidade digital ou a

29 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2022, p. 14.

30 XU *et al.*, 2020, p. 218.

31 EIA, 2021, p. 11.

indústria de jogos. De acordo com um estudo da *McKinsey & Company*³², o setor financeiro contribui com cerca de 12% do consumo energético total de *data centers* globais, enquanto setores como publicidade online e entretenimento digital são responsáveis por mais de 35%³³. Isso se deve ao fato de que esses setores dependem fortemente de IA para realizar inferências em tempo real, como a personalização de anúncios e recomendações de conteúdo, o que exige uma operação contínua de servidores em grande escala.

Outro setor que contribui significativamente para o consumo de recursos naturais é o de veículos autônomos. Empresas como Tesla e Waymo utilizam IA para o desenvolvimento de carros autônomos, que dependem de enormes quantidades de dados coletados de sensores e câmeras instalados nos veículos. O treinamento dos sistemas de IA que permitem que os carros naveguem de forma autônoma requer vastos recursos computacionais, o que, por sua vez, aumenta o consumo de energia dos *data centers* que suportam essas operações. Estima-se que a operação de veículos autônomos possa aumentar a demanda global por *data centers* em até 10% até 2030³⁴.

A situação também difere entre setores industriais. O setor de manufatura, por exemplo, está adotando a tecnologia de aprendizado profundo de máquina para otimizar processos de produção e reduzir desperdícios, o que pode levar a ganhos de eficiência que mitigam parte do impacto ambiental. No entanto, o uso crescente de IA para automação em fábricas também aumenta o consumo de energia em algumas indústrias, especialmente aquelas que utilizam robótica avançada e aprendizado de máquina para monitoramento em tempo real³⁵.

Essas comparações regionais e setoriais revelam que o impacto ambiental da IA é profundamente influenciado pela matriz energética de cada região e pelas necessidades específicas de cada setor. Enquanto alguns países e indústrias estão adotando medidas para mitigar os efeitos ambientais do crescimento da IA, outros ainda enfrentam desafios significativos, especialmente em termos de transição para fontes de energia mais limpas e o gerenciamento eficiente do consumo de água em *data centers*. Portanto, a adoção de IA de maneira sustentável requer uma abordagem multifacetada que leve em consideração as diferenças regionais e setoriais. Políticas públicas que incentivem o uso de energias renováveis e promovam a eficiência hídrica e energética em *data centers* são fundamentais para garantir que o impacto ambiental dos sistemas de IA seja minimizado, especialmente em regiões e setores onde o consumo de recursos naturais ainda é elevado.

32 MCKINSEY, 2021.

33 *Ibid.*, p. 29.

34 ESTRADA et al., 2020, p. 58.

35 MALLICK et al., *op. Cit.*, p. 120.

3. INICIATIVAS DE REGULAÇÃO E CONTROLE AMBIENTAL AO REDOR DO MUNDO

A União Europeia (UE) tem se destacado como uma das regiões mais proativas na adoção de políticas ambientais voltadas para a sustentabilidade digital, incluindo a regulação dos impactos ambientais das tecnologias de inteligência artificial (IA). Com o lançamento do *Pacto Verde Europeu (European Green Deal)* em dezembro de 2019, a UE delineou um plano ambicioso para tornar o continente neutro em emissões de carbono até 2050. Dentro desse contexto, a digitalização sustentável desempenha um papel central, uma vez que o crescimento exponencial da demanda por IA e outras tecnologias digitais tem pressionado o consumo de energia e recursos naturais, exigindo uma resposta coordenada e robusta em termos regulatórios.

O *Pacto Verde Europeu* estabelece metas claras para a descarbonização do setor de tecnologia, com foco na transição para energias renováveis e na promoção de maior eficiência energética em *data centers* e infraestruturas digitais. De acordo com a Comissão Europeia³⁶, o setor de tecnologia deve ser neutro em carbono até 2030, e todos os *data centers* localizados no bloco europeu precisam ser altamente eficientes em termos energéticos e utilizar 100% de energia proveniente de fontes renováveis até o final dessa década³⁷. Para alcançar esses objetivos, o pacto prevê a criação de regulamentações mais rígidas, incentivos fiscais para empresas que investem em tecnologias verdes e maior monitoramento do consumo de energia em grandes plataformas tecnológicas e a promoção da economia circular no setor digital³⁸.

Uma das principais iniciativas regulamentares é a *Digital Strategy for Europe (Estratégia Digital para a Europa)*, que busca integrar as tecnologias emergentes, como IA, à transição ecológica, promovendo a criação de uma infraestrutura digital sustentável. A estratégia inclui a implementação de padrões técnicos rigorosos para *data centers*, como a certificação *Climate Neutral Data Centre Pact*, que estabelece critérios para garantir que esses centros operem de maneira eficiente em termos de consumo de energia e água, além de exigir a utilização de fontes renováveis. Esta certificação é um passo importante para garantir que a expansão dos sistemas de IA ocorra de maneira sustentável e que as empresas de tecnologia que operam no bloco cumpram os padrões de sustentabilidade³⁹.

Além disso, o bloco europeu também promove a transparência em relação ao consumo de energia pelas grandes empresas de tecnologia. A proposta de

36 COMISSÃO EUROPEIA, 2020.

37 Ibid., p. 7.

38 Ibid., p. 11.

39 Ibid., p. 9.

regulamentação do *Digital Services Act (DSA)* e do *Digital Markets Act (DMA)* inclui requisitos para que plataformas digitais divulguem relatórios anuais detalhando suas emissões de carbono e o consumo de energia de seus *data centers*⁴⁰. Essa exigência é vista como uma forma de pressionar as empresas a adotarem práticas mais sustentáveis e investirem em soluções tecnológicas que reduzam suas pegadas de carbono.

Paralelamente, a UE também tem promovido a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que possam ajudar a reduzir o consumo energético dos sistemas de IA. O *Horizon Europe*, principal programa de financiamento de pesquisa e inovação da UE para o período de 2021-2027, inclui investimentos significativos em projetos voltados para IA sustentável, resfriamento eficiente de *data centers* e tecnologias de computação de baixo consumo energético. O objetivo é criar uma infraestrutura digital mais verde e resiliente⁴¹.

No entanto, apesar dessas iniciativas, ainda existem desafios para garantir que todas as empresas de tecnologia operando no bloco cumpram as novas regulamentações. Um dos principais obstáculos é a implementação efetiva dos padrões de sustentabilidade em toda a União Europeia, especialmente em estados-membros que ainda dependem de fontes de energia não renováveis⁴².

Além disso, o *Pacto Verde Europeu* reconhece que os desafios ambientais, incluindo os associados ao crescimento da IA, são globais e, portanto, requerem uma resposta internacional coordenada. Para isso, a UE tem buscado fortalecer sua cooperação internacional com outras grandes economias, como Estados Unidos e China, para incentivar a adoção de práticas sustentáveis em nível global, promovendo a troca de conhecimentos e melhores práticas para a redução das emissões de carbono no setor digital⁴³.

Nos Estados Unidos, a regulação ambiental das tecnologias digitais, incluindo a inteligência artificial (IA), tem avançado de maneira mais lenta e fragmentada em comparação com a União Europeia. O país carece de uma política climática unificada e abrangente para o setor de tecnologia, o que resulta em disparidades regionais quanto à aplicação de regulamentos ambientais. Apesar disso, a crescente pressão pública e as preocupações com as mudanças climáticas têm levado a discussões sobre a necessidade de regulamentações mais rígidas, tanto em nível federal quanto estadual. Essas discussões são particularmente relevantes, dado o impacto ambiental substancial do setor de tecnologia, especialmente em termos de consumo energético e emissões de carbono.

Atualmente, os Estados Unidos são o lar de algumas das maiores empresas de tecnologia do mundo, como Google, Amazon, Microsoft e Facebook.

40 EUROPEAN PARLIAMENT, 2021, p. 15.

41 COMISSÃO EUROPEIA, 2021, p. 19.

42 EUROPEAN PARLIAMENT, 2021, p. 17.

43 COMISSÃO EUROPEIA, 2020, p. 18.

Essas empresas operam grandes infraestruturas de *data centers* que consomem quantidades massivas de eletricidade para alimentar e resfriar os servidores usados no processamento de IA. De acordo com o relatório da *U.S. Energy Information Administration (EIA)*, os *data centers* nos Estados Unidos consumiram cerca de 70 TWh de eletricidade em 2020, representando aproximadamente 2% do consumo total de eletricidade do país⁴⁴. Esse consumo de energia é impulsionado pela crescente demanda por IA, armazenamento em nuvem e outros serviços digitais, que dependem de *data centers* de alta capacidade. Entretanto, grande parte dessa eletricidade ainda é gerada a partir de fontes não renováveis, como gás natural e carvão, o que contribui significativamente para as emissões de carbono do país.

A necessidade de regulamentações mais rígidas no setor de tecnologia tem sido reconhecida por organizações ambientais e por alguns legisladores americanos. Em resposta a essas pressões, algumas iniciativas começaram a surgir, tanto em nível federal quanto estadual. Um dos primeiros esforços em nível federal foi o *Clean Energy Standard* proposto pelo governo dos Estados Unidos, que visa a transição para uma matriz energética mais limpa. O plano estabelece metas para que 80% da eletricidade do país seja gerada a partir de fontes limpas até 2030, o que teria um impacto significativo na redução das emissões de carbono associadas às operações de *data centers*⁴⁵. Contudo, o plano enfrenta desafios políticos e legislativos, o que tem dificultado sua implementação completa.

No nível estadual, a Califórnia tem se destacado como uma das regiões mais progressistas em termos de regulação ambiental, incluindo a regulamentação de *data centers* e tecnologias digitais. Em 2018, o estado implementou o *Clean Energy and Pollution Reduction Act (SB 100)*, que estabelece a meta de fornecer 100% de eletricidade a partir de fontes limpas até 2045. Isso tem incentivado grandes empresas de tecnologia com sede na Califórnia a investirem em energia renovável para suas operações, incluindo a construção de *data centers* movidos a energia solar e eólica⁴⁶.

Em 2021, a Califórnia introduziu regulamentações que exigem que novos *data centers* submetam planos de gestão de recursos hídricos como parte do processo de licenciamento, com o objetivo de garantir que o uso de água seja sustentável e compatível com as metas de conservação do estado⁴⁷. A Comissão de Energia da Califórnia também está incentivando a adoção de tecnologias de resfriamento a ar em regiões onde o uso de água para resfriamento pode representar um risco para o abastecimento de recursos hídricos. Empresas como Google e Facebook anunciaram que suas operações em *data centers* na Califór-

44 EIA, 2021, p. 14.

45 WHITE HOUSE, 2021, p. 8.

46 CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2020, p. 11.

47 CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2021, p. 12.

nia já são 100% alimentadas por energia renovável, em conformidade com as metas do estado⁴⁸.

Outra iniciativa importante nos Estados Unidos é o *Climate Neutral Data Centre Pact*, uma parceria entre grandes empresas de tecnologia que se comprometeram a tornar suas operações de *data centers* neutras em carbono até 2030. Esse pacto visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover práticas de eficiência energética em *data centers* localizados nos Estados Unidos. Embora essa iniciativa seja voluntária e liderada pelo setor privado, ela reflete um movimento crescente em direção à sustentabilidade no setor de tecnologia⁴⁹. Além disso, a colaboração entre empresas de tecnologia e governos estaduais tem sido fundamental para impulsionar o uso de fontes de energia renovável, especialmente em estados como Texas, onde o uso de energia eólica para alimentar *data centers* aumentou significativamente nos últimos anos⁵⁰.

Apesar desses avanços, ainda há um longo caminho a percorrer em termos de regulamentações ambientais mais rígidas para IA e tecnologias digitais nos Estados Unidos. A fragmentação das políticas ambientais entre os estados e a falta de um marco regulatório federal abrangente dificultam uma transição mais rápida para uma economia digital sustentável. Como apontado por Malick *et al.*⁵¹ “embora alguns estados estejam liderando a transição para energias limpas, outros continuam a depender fortemente de combustíveis fósseis, o que resulta em uma abordagem inconsistente em relação à sustentabilidade dos *data centers* no país”. Além disso, muitas das iniciativas existentes são voluntárias, e a ausência de uma legislação federal vinculativa dificulta o controle rigoroso das emissões de carbono associadas ao setor de tecnologia.

Outro ponto importante em discussão é a necessidade de maior transparência por parte das empresas de tecnologia em relação ao seu consumo de energia e impacto ambiental. Em 2020, foi proposta a criação de uma regulamentação federal que obrigaría as empresas de tecnologia a divulgarem relatórios anuais detalhando o consumo de eletricidade de seus *data centers* e as emissões de carbono associadas. A proposta, conhecida como *Digital Transparency Act*, ainda está em discussão no Congresso, mas já tem apoio de várias organizações ambientais que veem a medida como essencial para aumentar a responsabilidade ambiental das grandes corporações tecnológicas⁵².

Além disso, especialistas destacam a necessidade de regulamentações específicas para o uso de IA em setores intensivos em recursos, como o financeiro e o de transportes. O crescimento do uso de IA nesses setores tem aumentado

48 GOOGLE, 2021, p. 7.

49 CLIMATE NEUTRAL DATA CENTRE PACT, 2021, p. 4.

50 EIA, 2021, p. 19.

51 MALICK *et al.*, 2021, p. 122.

52 U.S. CONGRESS, 2020, p. 12.

significativamente o consumo de energia, especialmente devido à dependência de inferências em tempo real e ao uso de grandes modelos de aprendizado profundo. Como observam Halevi, *et al.*⁵³, “o uso de IA em sistemas financeiros e veículos autônomos tem se tornado cada vez mais comum, mas a regulação sobre o impacto ambiental dessas tecnologias ainda é insuficiente”. Regulamentações específicas para o uso de IA nesses setores poderiam ajudar a mitigar os impactos ambientais e a promover a adoção de práticas mais sustentáveis.

Em suma, os Estados Unidos estão em um momento crítico no que diz respeito à regulação ambiental do setor de tecnologia e IA. Embora existam iniciativas promissoras em nível estadual e por parte do setor privado, a ausência de um marco regulatório federal abrangente representa um desafio significativo. O avanço de legislações como o *Clean Energy Standard* e o *Digital Transparency Act* seria um passo importante para promover uma economia digital mais sustentável e mitigar os impactos ambientais das tecnologias de IA.

Na China o cenário muda, o país tem se consolidado como uma das maiores potências no desenvolvimento e implementação de inteligência artificial (IA), impulsionada por políticas governamentais ambiciosas e investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento. No entanto, o rápido crescimento do setor de IA no país também resultou em desafios ambientais consideráveis, especialmente em termos de consumo energético e emissões de carbono. A dependência da China de fontes de energia não renováveis, como o carvão, agrava o impacto ambiental das operações de data centers e outras infraestruturas tecnológicas que sustentam a IA. De acordo com Xu *et al.*⁵⁴, aproximadamente 60% da eletricidade consumida na China em 2020 foi gerada a partir de carvão, o que contribui substancialmente para as emissões de gases de efeito estufa associadas ao setor de tecnologia.

Reconhecendo a necessidade de mitigar os impactos ambientais de seu crescimento digital, a China implementou várias estratégias regulatórias voltadas para a redução de emissões de carbono e a promoção da eficiência energética. Em 2020, o governo chinês anunciou seu compromisso de atingir o pico de emissões de carbono até 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2060. Essa meta ambiciosa, delineada no 14º *Plano Quinquenal*, estabelece um roteiro claro para a transição da China para uma economia mais sustentável, com ênfase na redução do consumo de energia em setores de alta tecnologia, como IA e infraestrutura de dados⁵⁵.

Um dos principais esforços regulatórios adotados pelo governo chinês para mitigar o impacto ambiental dos data centers é o *Plano de Desenvolvimento de Data Centers Verdes (Green Data Center Development Plan)*, lançado

53 HALEVI, *et al.* 2017, p. 238.

54 XU, *et al.* 2020, p. 218.

55 GOVERNO DA CHINA, 2020, p. 5.

em 2021. O plano exige que novos *data centers* sejam construídos com padrões mais rígidos de eficiência energética, incluindo o uso de tecnologias avançadas de resfriamento e a integração de fontes de energia renováveis, como solar e eólica. O objetivo é garantir que, até 2025, todos os novos *data centers* na China operem com um índice de eficiência de energia (*PUE*, na sigla em inglês) abaixo de 1,5, o que representaria uma melhoria significativa em relação à média atual de 2,2 observada nos centros mais antigos⁵⁶.

Além disso, o governo chinês tem incentivado a construção de *data centers* em regiões com climas mais frios, como Mongólia Interior e as províncias do nordeste, onde o resfriamento natural pode reduzir a necessidade de sistemas de refrigeração intensivos em energia. Essa estratégia faz parte de um esforço mais amplo para descentralizar a infraestrutura de IA e tem o benefício adicional de reduzir a pressão sobre os recursos hídricos em regiões mais secas, como o leste da China, onde o uso intensivo de água para resfriamento de *data centers* tem sido uma questão crítica⁵⁷.

Outro aspecto importante da estratégia de mitigação da China é o investimento em energias renováveis. Em 2021, a China foi responsável por cerca de 40% dos investimentos globais em energias renováveis, com foco em energia solar e eólica. O governo tem incentivado empresas de tecnologia a investir em projetos de energia renovável para alimentar suas operações. A gigante de tecnologia Alibaba, por exemplo, anunciou que seu novo *data center* em Zhangbei, uma região com grande potencial para energia eólica e solar, será alimentado quase inteiramente por fontes renováveis⁵⁸. Esse exemplo demonstra o compromisso do setor privado chinês em colaborar com as metas governamentais de sustentabilidade.

Apesar dessas iniciativas, a China enfrenta desafios consideráveis na implementação de suas metas de sustentabilidade, especialmente devido à rápida expansão de sua infraestrutura digital. A demanda por IA, serviços em nuvem e tecnologia de telecomunicações 5G continua a crescer exponencialmente, o que tem resultado em um aumento no número de *data centers* em operação no país. Em 2020, a China já operava mais de 1.200 centros de processamento de dados de grande escala, um número que deve aumentar nos próximos anos para atender à crescente demanda por serviços digitais⁵⁹, o que dificulta o cumprimento das metas de neutralidade de carbono estabelecidas no 14º *Plano Quinquenal*.

Para enfrentar esses desafios, a China também tem promovido a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras de IA que sejam mais eficientes em termos de consumo de energia de modo crucial. Um exemplo disso é o

56 GOVERNO DA CHINA, 2021, p. 12.

57 XU, *et al.*, 2020, p. 220.

58 ALIBABA, 2021, p. 8.

59 ESTRADA, *et al.*, 2020, p. 56.

foco do país em IA baseada em algoritmos de aprendizado profundo de baixo consumo energético. Pesquisadores chineses têm trabalhado em arquiteturas de redes neurais que requerem menos poder computacional para treinar e executar, o que pode reduzir significativamente o consumo de energia associado às operações de IA⁶⁰.

Além disso, a China também tem investido no desenvolvimento de tecnologias de resfriamento mais eficientes para *data centers*. Uma das soluções promissoras é o resfriamento líquido, que utiliza fluidos especiais para dissipar o calor dos servidores de forma mais eficiente do que os sistemas de resfriamento a ar convencionais. A Huawei, uma das maiores empresas de tecnologia da China, lançou em 2021 um sistema de resfriamento líquido para *data centers* que, segundo a empresa, pode reduzir o consumo de energia em até 30% em comparação com as tecnologias tradicionais⁶¹.

Apesar de todos os avanços, a transição para uma infraestrutura de IA sustentável na China ainda enfrenta obstáculos significativos, particularmente em relação à dependência contínua do carvão como fonte de energia. Embora o governo chinês esteja comprometido com a ampliação do uso de energias renováveis, o ritmo da transição ainda não é rápido o suficiente para atender à crescente demanda por eletricidade associada ao setor de tecnologia. Como observam Zhang e Dai⁶², “a transição energética da China depende de uma reestruturação profunda de sua matriz energética, e o crescimento contínuo da demanda por IA torna essa transição ainda mais desafiadora”. Em resumo, a China está enfrentando o desafio de equilibrar seu rápido crescimento no setor de IA com a necessidade urgente de mitigar seus impactos ambientais.

4. A REGULAÇÃO AMBIENTAL DA TECNOLOGIA EM GRANDES POTÊNCIAS

À medida que o uso de inteligência artificial (IA) continua a crescer exponencialmente, torna-se cada vez mais urgente a necessidade de tornar essa tecnologia sustentável para garantir que os benefícios tecnológicos possam ser aproveitados sem comprometer os recursos naturais e o equilíbrio ambiental. Para alcançar esse objetivo, uma série de propostas têm sido sugeridas por pesquisadores e especialistas, abordando tanto inovações tecnológicas quanto políticas públicas.

Uma das principais propostas para a promoção de uma IA mais sustentável é o desenvolvimento de modelos de IA mais eficientes em termos energéticos. O treinamento de grandes modelos de aprendizado profundo, como redes

60 ZHANG; DAI, 2021, p. 129.

61 HUAWEI, 2021, p. 15.

62 ZHANG, DAI, 2021, p. 130.

neurais convolucionais, consome quantidades enormes de energia, uma vez que exige inúmeras iterações e cálculos em grandes volumes de dados. No entanto, pesquisadores já estão explorando alternativas para reduzir esse impacto. Segundo Zhang e Dai⁶³, uma das abordagens mais promissoras é a criação de modelos de aprendizado profundo mais leves, que requerem menos dados para treinamento e operam com menos camadas de redes neurais. Essa abordagem, conhecida como *efficient deep learning*, visa reduzir a complexidade dos modelos, permitindo que eles mantenham alta precisão sem a necessidade de enormes recursos computacionais.

Além do desenvolvimento de algoritmos mais eficientes, outra proposta importante é a utilização de fontes de energia renovável para alimentar os *data centers* que sustentam a IA. Muitas grandes empresas de tecnologia já começaram a investir em energias limpas, como solar e eólica, para alimentar suas operações. No entanto, a transição para fontes renováveis precisa ser acelerada em todo o setor de tecnologia, especialmente em países onde a matriz energética ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis. A adoção de políticas públicas que incentivem o uso de energias renováveis, como subsídios governamentais e créditos fiscais, pode ser uma maneira eficaz de promover essa transição em maior escala⁶⁴.

A otimização do uso de energia nos *data centers* também desempenha um papel crucial na criação de uma IA mais sustentável. Tecnologias de resfriamento mais eficientes, como o resfriamento a líquido e o resfriamento passivo, podem reduzir significativamente o consumo de eletricidade e de água, que são necessários para manter a temperatura dos servidores em níveis adequados. O uso de inteligência artificial para gerenciar a eficiência energética dos próprios *data centers* também é uma solução promissora. Sistemas inteligentes podem monitorar o desempenho dos servidores em tempo real, ajustando dinamicamente o uso de energia e otimizando os recursos de resfriamento para maximizar a eficiência e minimizar o desperdício⁶⁵, como o exemplo da Huawei⁶⁶.

Outra estratégia importante é a promoção da economia circular dentro da infraestrutura de IA. O ciclo de vida dos servidores e equipamentos de *data centers* é relativamente curto, devido ao rápido avanço da tecnologia, o que gera uma grande quantidade de resíduos eletrônicos. Promover a reciclagem e o reaproveitamento de *hardware* pode reduzir a necessidade de fabricação de novos equipamentos, o que, por sua vez, diminui a demanda por recursos naturais e a energia necessária para sua produção. De acordo com a Comissão Europeia⁶⁷,

63 ZHANG, DAI, 2021, p. 129.

64 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2020, p. 11.

65 MALLICK et al., 2021, p. 120.

66 HUAWEI, 2021, p. 16.

67 COMISSÃO EUROPEIA, 2021, p. 10.

a economia circular no setor de tecnologia pode ser fomentada por meio de regulamentações que exijam o reaproveitamento de componentes eletrônicos e a reciclagem obrigatória de equipamentos ao final de seu ciclo de vida. A *Estratégia Digital para a Europa* estabelece a meta de reduzir o desperdício eletrônico em 50% até 2030, promovendo uma abordagem mais sustentável para o ciclo de vida dos equipamentos utilizados em *data centers* e operações de IA⁶⁸.

Além dessas iniciativas tecnológicas, o incentivo à pesquisa em IA sustentável também é fundamental para melhorar o quadro geral. Programas de financiamento, como o *Horizon Europe*, da União Europeia, destinam bilhões de euros para projetos de pesquisa e desenvolvimento que buscam soluções para reduzir o impacto ambiental da IA, incluindo novas abordagens para aprendizado de máquina de baixo consumo energético e tecnologias de resfriamento mais eficientes⁶⁹. Nos Estados Unidos, o *Advanced Research Projects Agency-Energy* (ARPA-E) tem apoiado projetos de inovação voltados para a criação de data centers mais eficientes, promovendo parcerias entre universidades e empresas de tecnologia para desenvolver soluções sustentáveis⁷⁰.

Além disso, a transparência no consumo de energia e nas emissões de carbono das operações de IA é uma questão essencial para o avanço da sustentabilidade. Regulamentações que exijam que empresas de tecnologia divulguem dados detalhados sobre seu consumo de energia e impacto ambiental podem ajudar a pressionar essas empresas a adotarem práticas mais sustentáveis. O *Digital Transparency Act* proposto nos Estados Unidos, por exemplo, visa aumentar a responsabilidade ambiental das grandes empresas de tecnologia, exigindo que elas publiquem relatórios anuais sobre suas operações, incluindo dados sobre o uso de água, eletricidade e emissões de carbono⁷¹. Essa medida pode ser um importante passo para assegurar que o crescimento tecnológico ocorra de maneira sustentável e transparente.

Finalmente, a educação e a conscientização são fundamentais para garantir uma IA mais sustentável no futuro. À medida que sistemas de aprendizado profundo se tornam parte integral das operações comerciais e da vida cotidiana, é essencial que tanto os profissionais de tecnologia quanto os consumidores estejam cientes dos impactos ambientais da tecnologia e das maneiras de reduzi-los. Iniciativas que promovam a conscientização ambiental dentro das empresas de tecnologia e programas de capacitação que ensinem os desenvolvedores a criar sistemas de IA mais eficientes podem desempenhar um papel crucial na construção de uma cultura de sustentabilidade no setor⁷².

68 *Ibid.*, p. 11.

69 *Ibid.*, p. 12.

70 WHITE HOUSE, 2021, p. 9.

71 U.S. CONGRESS, 2020, p. 12.

72 MALLICK et al., 2021, p. 122.

Em suma, a necessidade de IA sustentável é inegável diante do impacto ambiental crescente gerado por essa tecnologia. Para mitigar esse impacto, é necessário um esforço coordenado entre inovação tecnológica, políticas públicas e conscientização ambiental. A criação de modelos de IA mais eficientes, o uso de fontes de energia renováveis, a otimização do consumo de energia e água nos *data centers*, a promoção da economia circular e a implementação de regulamentações que incentivem a transparência e a responsabilidade ambiental são todas soluções viáveis e necessárias para garantir que o avanço da IA esteja alinhado com os princípios da sustentabilidade.

CONCLUSÃO

A inteligência artificial (IA) tem se mostrado uma ferramenta poderosa para diversas áreas da economia e da sociedade, trazendo inovações e melhorias em setores como saúde, finanças, transporte e educação. No entanto, o avanço dessa tecnologia também levanta sérias preocupações ambientais, conforme demonstrado ao longo deste estudo. O consumo energético crescente e o esgotamento dos recursos hídricos são dois dos principais desafios associados à expansão da IA, especialmente no contexto do uso intensivo de *data centers* e modelos de aprendizado profundo que demandam grandes quantidades de energia e água.

A partir dos dados apresentados, fica claro que as regiões que adotam uma matriz energética baseada em fontes renováveis, como os países nórdicos, têm conseguido mitigar parte dos impactos ambientais gerados pela tecnologia. No entanto, grandes economias como os Estados Unidos e a China, que ainda dependem fortemente de fontes de energia não renováveis, enfrentam um desafio maior em termos de sustentabilidade. Embora políticas como o Pacto Verde Europeu e iniciativas voluntárias no setor privado, como o *Climate Neutral Data Centre Pact*, representem passos importantes para a redução do impacto ambiental, essas iniciativas ainda precisam ser ampliadas e implementadas de forma global.

A demanda por IA, conforme visto, continua a crescer exponencialmente e, com isso, a necessidade de tecnologias mais eficientes do ponto de vista energético se torna imperativa. Soluções como o aprendizado profundo eficiente, tecnologias de resfriamento inovadoras e a promoção da economia circular são fundamentais para reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar o impacto ambiental. No entanto, essas soluções tecnológicas precisam ser acompanhadas por regulamentações eficazes e políticas públicas que incentivem a sustentabilidade e a transparência no uso de recursos pelas grandes empresas de tecnologia.

Além disso, a colaboração internacional será essencial para enfrentar os desafios futuros. As emissões de carbono e o esgotamento de recursos hídricos

associados à IA são problemas globais que exigem uma resposta coordenada, envolvendo governos, empresas e organizações internacionais. A implementação de padrões globais de sustentabilidade digital e a promoção de pesquisas em sistemas inteligentes de baixo consumo energético são passos cruciais para garantir que o avanço dessa tecnologia seja compatível com a preservação ambiental. Em resumo, a transição para uma tecnologia sustentável é tanto uma necessidade quanto uma oportunidade. A sustentabilidade da IA dependerá não apenas de inovações tecnológicas, mas também da adoção de políticas públicas robustas e de uma mudança de mentalidade nas práticas empresariais. Se adequadamente gerenciada, a IA pode ser uma aliada na luta contra as mudanças climáticas, contribuindo para um futuro mais sustentável e equilibrado.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). *Data Centers and Energy Demand Report*. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/data-centers-and-energy-demand>. Acesso em: 10 out. 2023.
- _____. *Renewable Energy Data Centers: A Path to Sustainability*. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-data-centers>. Acesso em: 10 out. 2023.
- ALIBABA. *Sustainability and Data Center Report*. 2021. Disponível em: <https://www.alibabagroup.com/sustainability-reports>. Acesso em: 10 out. 2023.
- _____. O que é um Data Center? 2024. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/data-center/>. Acesso em 10 jan. 2024.
- BROWN, T. B. et al. Language Models are Few-Shot Learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*, v. 33, p. 1877-1901, 2020.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. *Clean Energy and Pollution Reduction Act (SB 100)*. 2020. Disponível em: <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics>. Acesso em: 10 out. 2023.
- CLIMATE NEUTRAL DATA CENTRE PACT. *Sustainable Data Center Initiative*. 2021. Disponível em: <https://www.climateneutraldatacentre.net>. Acesso em: 10 out. 2023.
- COMISSÃO EUROPEIA. *European Green Deal: Digital Transformation and Environmental Sustainability*. 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/strategy/european-green-deal_en. Acesso em: 10 out. 2023.
- COMISSÃO EUROPEIA. *Horizon Europe: Investing in Climate-Neutral and Digital Solutions*. 2021. Disponível em: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon-europe>. Acesso em: 10 out. 2023.

Paulo José Pereira C. Torres da Silva, Wilson Tadeu de C. Eccard e Jamile Sabbad Carecho Cavalcante

EIA. *U.S. Energy Consumption by Source and Sector*. 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/totals/energydata>. Acesso em: 10 out. 2023.

ESTRADA, S. et al. Artificial Intelligence and Machine Learning in Biotechnology. *Journal of Biotechnology*, v. 11, p. 54-68, 2020.

EUROPEAN PARLIAMENT. *Digital Services Act and Digital Markets Act: Ensuring Transparency and Sustainability*. 2021. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0020_EN.html. Acesso em: 10 out. 2023.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.

GOOGLE. *Environmental Report*. 2019. Disponível em: <https://sustainability.google/reports/>. Acesso em: 10 out. 2023.

GOVERNO DA CHINA. *14th Five-Year Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China (2021–2025)*. 2020. Disponível em: <https://www.ndrc.gov.cn/five-year-plans>. Acesso em: 10 out. 2023.

_____. *Green Data Center Development Plan*. 2021. Disponível em: <https://www.ndrc.gov.cn/policies-data-centers>. Acesso em: 10 out. 2023.

HALEVI, H. et al. Intelligent Systems in E-Commerce: AI in Retail Marketing. *Journal of Intelligent Systems*, v. 22, p. 234-240, 2017.

HUAWEI. *Energy Efficient Data Center Solutions*. 2021. Disponível em: <https://www.huawei.com/data-center-solutions>. Acesso em: 10 out. 2023.

MALLICK, A.; SINGH, V. B.; KUMAR, A. Energy Efficient Data Centers Using AI: A Sustainable Approach. *IEEE Access*, v. 9, p. 110-124, 2021.

MASANET, E. et al. The energy and climate implications of AI: Research directions and policy implications. *Environmental Research Letters*, v. 15, p. 1-10, 2020.

MCKINSEY & COMPANY. *Global Data Center Energy Report*. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/businessfunctions/sustainability>. Acesso em: 10 out. 2023.

MICROSOFT. *Project Natick: Data Center Submerso*. 2019. Disponível em: <https://news.microsoft.com/natick/>. Acesso em: 10 out. 2023.

_____. *Data Center Sustainability Report*. 2020. Disponível em: <https://news.microsoft.com/data-centers-report/>. Acesso em: 10 out. 2023.

NEWELL, A.; SIMON, H. *GPS: A Program that Simulates Human Thought*. New York: Academic Press, 1961.

OPENAI. Environmental Impacts of Large AI Models. *OpenAI Report*, 2020. Disponível em: <https://openai.com/research/>. Acesso em: 10 out. 2023.

_____. *GPT-3 Technical Report*. 2020. Disponível em: <https://openai.com/research/>. Acesso em: 10 out. 2023.

PACIFIC INSTITUTE. *Water and Data Centers: Reducing Water Usage in a Warming World*. 2022. Disponível em: <https://pacinst.org/data-centers/>. Acesso em: 10 out. 2023.

ROSEBROCK, A. *Deep Learning for Computer Vision: Expert Techniques to Train Advanced Neural Networks Using TensorFlow and Keras*. New York: PyImageSearch, 2019.

SCHMIDT, L.; PETERSON, M.; COOK, D. Water Usage in U.S. Data Centers: Sustainability Challenges and Opportunities. *International Journal of Water Resources Development*, v. 37, p. 64-79, 2021.

STRUBELL, E.; GANESH, A.; MCCALLUM, A. Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. *University of Massachusetts*. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1906.02243>. Acesso em: 10 out. 2023.

UNIÃO EUROPEIA. *European Green Deal: Digital Transformation and Environmental Sustainability*. 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/strategy/european-green-deal_en. Acesso em: 10 out. 2023.

U.S. CONGRESS. *Digital Transparency Act Proposal*. 2020. Disponível em: <https://www.congress.gov>. Acesso em: 10 out. 2023.

WHITE HOUSE. *Clean Energy Standard Proposal*. 2021. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/clean-energy>. Acesso em: 10 out. 2023.

XU, M.; JIAO, Y.; LI, H. The Role of AI and Big Data in Carbon Emissions Reduction in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 242, p. 216-225, 2020.

ZHANG, L.; DAI, J. Energy Efficient Artificial Intelligence in China: Innovations and Challenges. *Journal of Energy Research*, v. 39, p. 128-135, 2021.

Recebido em: 31/01/2025

Aprovado em: 05/05/2025