



Inteligência Artificial & Energia: Uma Visão Geral de Práticas Emergentes

TÍTULO

Inteligência artificial e energia: uma visão geral de práticas emergentes

EDITOR

CAF – banco de desenvolvimento da América Latina e do Caribe –

PRESIDÊNCIA EXECUTIVA

Sergio Díaz-Granados, Presidente Executivo

VICE-PRESIDÊNCIA CORPORATIVA DE PROGRAMAÇÃO ESTRATÉGICA

Christian Asinelli, Vice-Presidente

GERÊNCIA DE INFRAESTRUTURA PARA O DESENVOLVIMENTO

Ángel Cárdenas, Gerente

DIREÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E SERVIÇOS AO CIDADÃO

Javier Sánchez, Diretor

DIREÇÃO DE ENERGIA, GÁS E MINERAÇÃO ESTRATÉGICA

Sandra Conde, Diretora

AUTORAS

Natalia González Alarcón e Cristina Martínez Pinto, Stimson Fellows

EQUIPE CAF

Enrique Zapata, Juan Ríos, Sofía Lalinde,
Catalina Corredor e Marcelo Facchina

EQUIPE MICROSOFT

Daniel Korn e Andrés Rengifo

GESTÃO EDITORIAL

Direção de Comunicação Estratégica

DESIGN GRÁFICO

holasimple.com

Este documento foi traduzido do inglês com o Microsoft CoPilot.

*O logotipo da Microsoft é uma marca comercial registrada da Microsoft Corporation e é utilizado aqui com permissão. O uso do logotipo não implica afiliação nem endosso, por parte da Microsoft, de todo ou parte deste conteúdo. Todos os direitos reservados.

© 2025 Corporação Andina de Fomento.

Esta publicação está sujeita à Licença Creative Commons Atribuição–Não Comercial–Sem Derivações 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Para consultar uma cópia desta licença, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>.

As ideias e proposições contidas nesta edição são de responsabilidade exclusiva das autoras e não refletem a posição oficial da CAF. Os termos utilizados e a apresentação dos dados não implicam nenhuma posição da CAF quanto ao status legal de países, territórios, cidades ou regiões, nem quanto às suas autoridades, fronteiras ou limites.

Prólogo



SERGIO DÍAZ-GRANADOS

Presidente Executivo
CAF – banco de desenvolvimento
da América Latina e do Caribe –

O mundo está passando por uma transformação profunda impulsionada pela convergência de três forças definidoras: a crise climática, o aumento da desigualdade e a rápida mudança tecnológica. Na América Latina e no Caribe, essa dinâmica se cruza com a tripla transição — verde, digital e energética — com ênfase especial na promoção do desenvolvimento humano.

Nesse contexto, a inteligência artificial (IA) surgiu como uma das ferramentas mais disruptivas e promissoras do nosso tempo. Sua influência já é evidente no setor energético, onde possibilita previsões de demanda mais precisas, melhora a integração de fontes renováveis e reduz perdas na transmissão.

No entanto, esses avanços trazem desafios complexos — que vão desde o uso de estratégias de IA como habilitadoras de políticas industriais e produtivas mais amplas e o uso ético da IA, até riscos de cibersegurança e a busca pelo equilíbrio entre a necessidade de computação de alto desempenho e energia limpa na região.

Para a América Latina e o Caribe, uma região rica em recursos renováveis — dos corredores solares no Norte às vastas reservas hidrelétricas no Sul — a IA oferece um caminho para um futuro energético mais limpo, eficiente e inclusivo. Essa visão está intimamente ligada à “tripla transição” — verde, digital e energética — que a região deve enfrentar simultaneamente, tendo o desenvolvimento humano como núcleo. Concretizar esse potencial exige superar lacunas de infraestrutura, garantir financiamento em larga escala, enfrentar limitações institucionais e mitigar o risco de aumento da desigualdade caso a adoção seja desigual.

É por isso que o CAF – banco de desenvolvimento da América Latina e do Caribe – e a Microsoft uniram forças

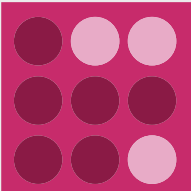
para patrocinar este relatório. Somos gratos aos Fellows do Stimson Center pela autoria da publicação e por toda a pesquisa de apoio. Nosso objetivo comum é combinar expertise técnica, conhecimento regional e melhores práticas globais para ajudar governos, empresas e comunidades a aproveitar a IA para a transformação energética, alinhando-a às prioridades climáticas e sociais.

Por meio deste relatório, buscamos fornecer aos tomadores de decisão ideias, exemplos regionais e recomendações práticas que orientem o uso responsável da IA no setor energético. Esta publicação pretende servir a formuladores de políticas, líderes da indústria, pesquisadores e profissionais que desejam compreender não apenas o papel transformador da IA na energia, mas também como implementá-la de forma que reflita os valores e prioridades da região. Ao combinar inovação tecnológica com governança sólida e colaboração intersetorial, a América Latina e o Caribe podem aproveitar a IA para construir um futuro energético mais limpo, inteligente e equitativo.

A estratégia regional de IA do CAF sustenta essa visão. Por meio de iniciativas como a Cúpula Ministerial sobre IA da América Latina e Caribe (CAF–UNESCO), o roteiro regional para uma IA ética e o apoio à governança da computação de alto desempenho, o CAF trabalha para garantir que a adoção da IA — especialmente em setores como energia — seja um catalisador para o desenvolvimento sustentável e a inclusão social.

Este relatório não é apenas uma reflexão sobre as oportunidades atuais, mas também uma pedra angular do compromisso mais amplo do CAF em posicionar a região na vanguarda da adoção responsável e transformadora da IA, ancorada em uma transição energética justa que equilibre a preservação ambiental com a inclusão social.

ÍNDICE



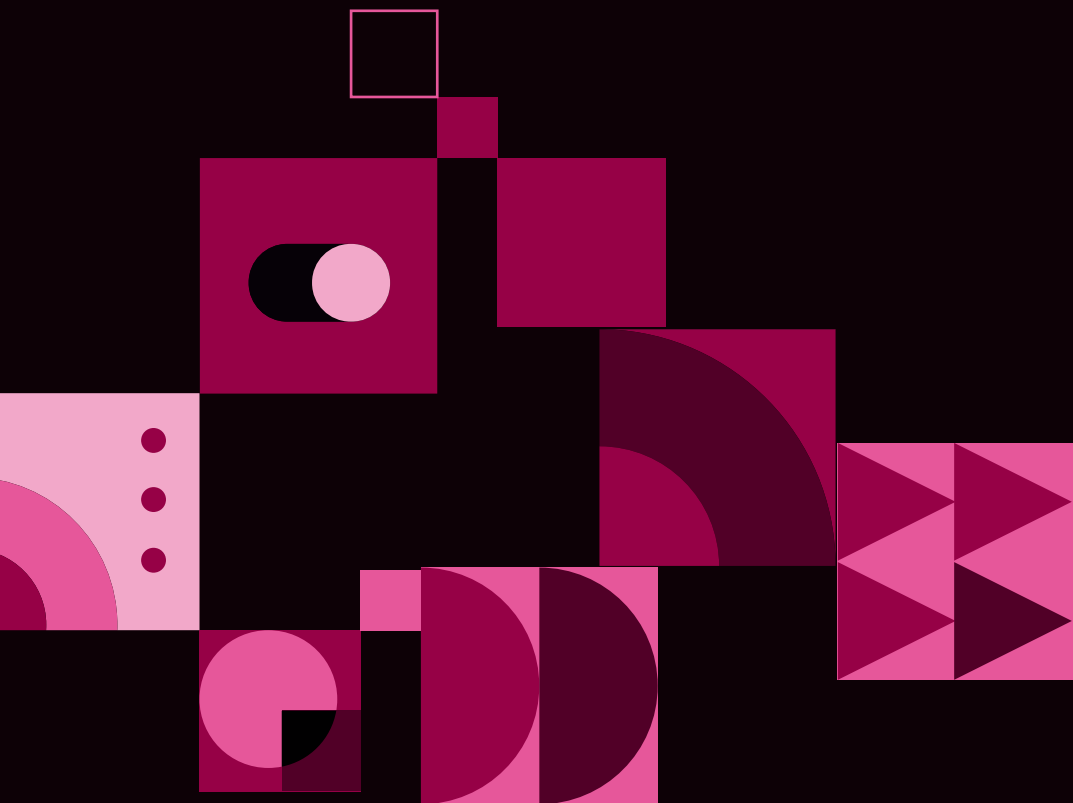
Resumo	05	
1. Introdução	06	
2. Conceitos emergentes	08	
Definições principais		
Pilares técnicos		
Dimensões sociotécnicas		
3. Tendências em IA & energia	12	
3.1. IA para otimização energética: Capacidades em evolução e limites		
3.2. Efeitos da IA sobre o consumo de energia: Nova demanda		
3.3. Balanço líquido de emissões da IA: Aumentos vs. reduções		
3.4. Energia limpa: Mudança de paradigmas		
3.5. Data centers: Uma nova agenda público-privada		
3.6. Participação comunitária: Oportunidades para o desenvolvimento local sustentável		
4. Recomendações e orientações para pesquisas futuras	21	
Recomendações de políticas e práticas		
Orientações para pesquisas futuras		
Referências	25	





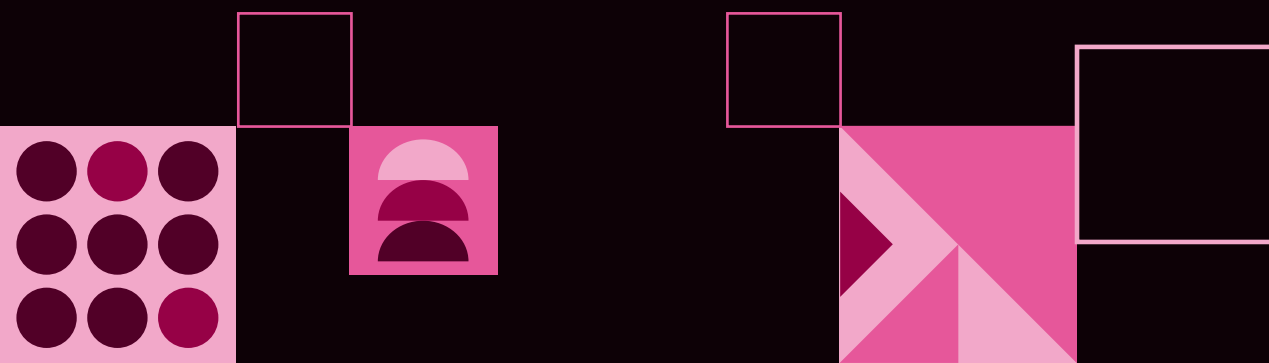
Resumo

A inteligência artificial (IA) está remodelando os sistemas elétricos ao otimizar a produção e o desempenho das redes, ao mesmo tempo em que impulsiona uma nova demanda por eletricidade causada por data centers que executam modelos generativos. Como facilitadora da descarbonização e fonte de crescente consumo de energia, a IA cria oportunidades para eficiência e inclusão, mas também intensifica riscos sociotécnicos ligados ao aumento do consumo elétrico e às lacunas de governança. Este *policy brief* analisa essas dinâmicas duais e tendências emergentes ao longo da cadeia de valor da energia, com foco na América Latina e no Caribe. Conclui com recomendações de políticas para alinhar a implantação da IA às metas climáticas, à equidade e às transições energéticas sustentáveis.



01

Introdução



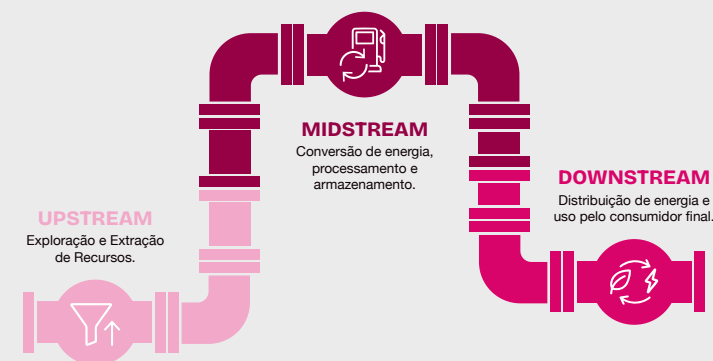
1. Introdução

O setor energético global está passando por uma transformação profunda impulsionada por quatro desafios interligados: mudança climática, desigualdade energética, eletrificação em escala econômica (transporte, aquecimento, indústria) e as crescentes demandas de energia da inteligência artificial (IA). Essas forças estão remodelando não apenas como a energia é produzida, distribuída e consumida, mas também como os sistemas tecnológicos são governados em relação à sustentabilidade ambiental e à equidade social.

A IA possui um enorme potencial para otimizar sistemas energéticos, acelerar a descarbonização e apoiar o acesso inclusivo à energia. No entanto, as crescentes demandas elétricas da infraestrutura de IA — provenientes de data centers, modelos generativos e computação em nuvem — estão impondo novas pressões sobre as redes elétricas e aumentando o consumo.

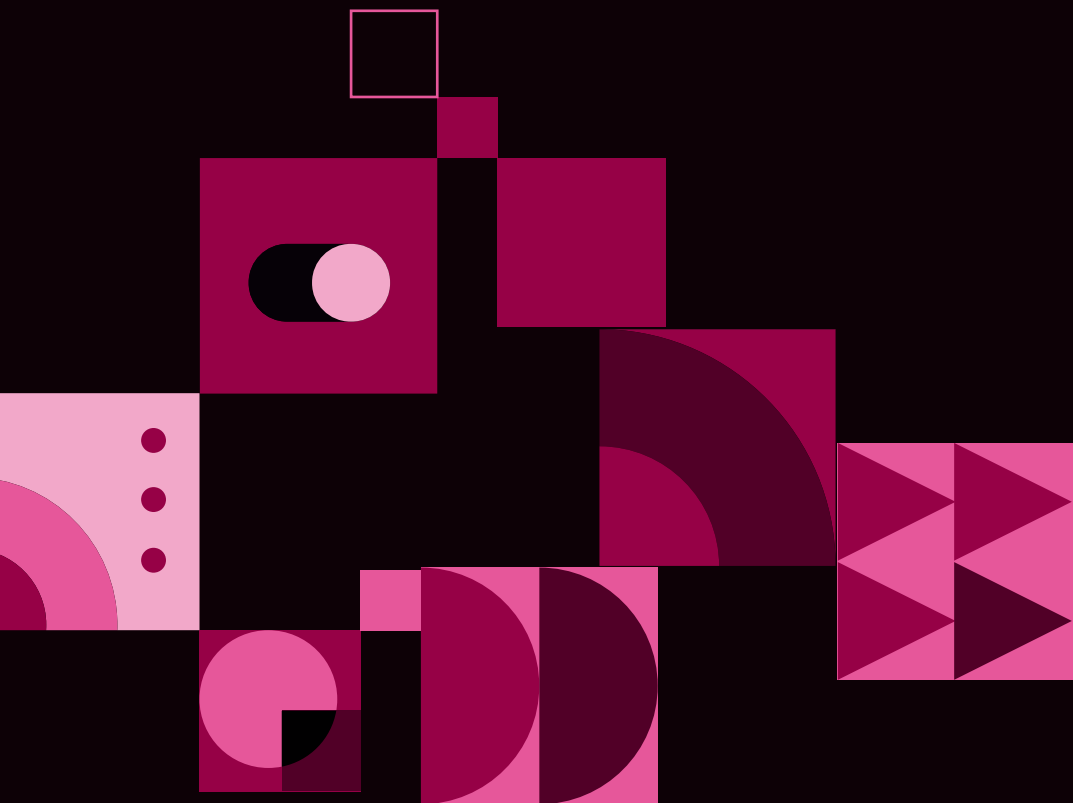
Para estruturar a análise que se segue, este *policy brief* adota uma visão abrangente da cadeia de valor da energia, uma estrutura conceitual amplamente utilizada no setor para mapear as etapas interconectadas dos sistemas energéticos. Segundo Luo et al. (2024), a cadeia de valor da energia abrange três segmentos principais: *upstream*, *midstream* e *downstream*.

Este *framework* apoia uma análise sistemática de como a IA se conecta a cada etapa, otimizando a produção, aprimorando o desempenho das redes e introduzindo novas formas de demanda.



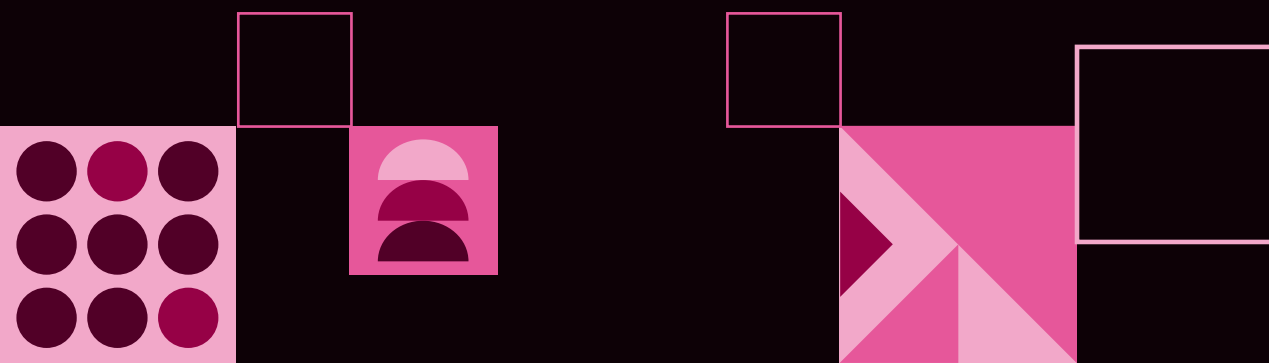
Source: Authors based on Luo et al. (2024)

Este *policy brief* examina os aspectos sociotécnicos e de governança dessa integração, com foco nas implicações para economias emergentes, especialmente na América Latina e no Caribe (ALC). Analisa o papel duplo da IA como ferramenta de otimização dos sistemas energéticos e como impulsionadora de novo consumo, destacando paradigmas emergentes, casos de uso regionais e estruturas de políticas. O documento conclui com considerações-chave para aproveitar a IA de forma responsável no setor energético, juntamente com recomendações para promover transparência, alinhar a infraestrutura digital às metas climáticas e garantir que os benefícios da IA nos sistemas energéticos sejam distribuídos de maneira equitativa.



02

Conceitos emergentes





2. Conceitos emergentes

A integração da IA nos sistemas energéticos está gerando um conjunto mais amplo de tendências que combinam inovação técnica com considerações ambientais e sociais. Esta seção apresenta definições-chave, pilares técnicos e dimensões sociotécnicas que servem como base conceitual para este documento de política.

Definições principais

- **IA para Descarbonização:** Aplicação estratégica da IA para reduzir emissões de carbono ao longo da cadeia de valor da energia. Inclui otimização da integração de renováveis, redução de desperdícios na produção, distribuição e uso de energia, além de possibilitar processos industriais mais eficientes (IEA, Energy and AI analysis, 2024; Microsoft, AI for Sustainability Playbook).
- **Justiça Energética:** Estrutura que busca garantir acesso equitativo às tecnologias de energia limpa, enfatizando participação, reconhecimento e distribuição justa de benefícios e encargos. Sistemas de IA devem ser projetados para promover inclusão e evitar reforçar desigualdades existentes (Global Green Skills Report, 2024).

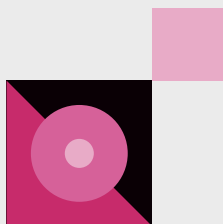
- **IA Nature-Positive:** Paradigma emergente que alinha o desenvolvimento e a aplicação da IA com metas de biodiversidade e regeneração ecológica. Esse conceito “*nature-positive*” visa deter e reverter a perda da natureza até 2030. (Lambertini, 2023). A UNESCO está desenvolvendo seu primeiro Kit de Ferramentas de IA *Nature-Positive* para formuladores de políticas, previsto para dezembro de 2025.
- **Energias Verdes:** Fontes de energia renovável e de baixo carbono (ex.: solar, eólica, geotérmica) apoiadas por IA para melhorar previsões, eficiência e integração às redes nacionais (IEA, World Energy Outlook, 2024 & 2025).

Pilares técnicos

O papel operacional da IA no setor energético é moldado por um conjunto de tecnologias:

- **Redes Inteligentes (*Smart Grids*):** Sistemas dinâmicos de distribuição de energia orientados por dados, aprimorados pela IA para tomada de decisão em tempo real e gestão adaptativa de carga (IEA, Energy and AI Analysis, 2024). A IA em redes inteligentes utiliza aprendizado por reforço

para equilibrar oferta e demanda em tempo real, enquanto redes neurais gráficas capturam a complexidade das topologias para prever falhas em cascata. Para lidar com a sensibilidade dos dados entre concessionárias, o aprendizado federado é cada vez mais usado para treinar modelos de forma colaborativa sem centralizar dados. Esses métodos permitem sistemas de distribuição mais adaptativos, seguros e com preservação de privacidade.



- **Manutenção Preditiva:** Diagnósticos habilitados por IA que antecipam falhas em equipamentos da infraestrutura energética, reduzindo tempo de inatividade e custos de manutenção (IBM, Future of AI & Energy Efficiency). Para manutenção preditiva, modelos de deep learning como redes neurais convolucionais e recorrentes são aplicados a dados de sensores para detectar anomalias e prever falhas antes que ocorram. Abordagens bayesianas adicionam raciocínio probabilístico para lidar com incertezas nas condições operacionais, enquanto o aprendizado por transferência permite aplicar insights de um tipo de ativo a outro com dados limitados de falhas. Essas técnicas reduzem o tempo de inatividade e melhoram a confiabilidade da infraestrutura energética.
- **Gêmeos Digitais (Digital Twins):** Réplicas virtuais de ativos ou sistemas energéticos que permitem simulação, otimização de desempenho e análise de cenários (Microsoft, AI for Sustainability Playbook). Métodos de IA para gêmeos digitais combinam redes neurais informadas por física com aprendizado de máquina, unindo modelos teóricos e dados empíricos para criar réplicas virtuais altamente

precisas. A IA generativa amplia as capacidades ao simular uma ampla gama de cenários operacionais, incluindo condições raras ou extremas, enquanto algoritmos de otimização ajudam a refinar o desempenho do sistema em tempo real. Assim, os gêmeos digitais tornam-se sistemas “vivos” em evolução contínua para operações energéticas.

- **Prosumidores e Microgrids:** Modelos descentralizados onde consumidores também geram energia (ex.: painéis solares residenciais) e contribuem para sistemas de rede local gerenciados por IA (Oxford TIDE, 2025). A IA em sistemas de prosumidores e *microgrids* frequentemente utiliza modelos multiagentes, onde cada residência ou gerador local é representado como um agente que negocia fluxos de energia. Tecnologias blockchain combinadas com IA fornecem transações de energia peer-to-peer seguras e transparentes, enquanto modelos avançados de previsão integram dados climáticos e de demanda para otimizar geração e armazenamento local. Essa combinação apoia redes energéticas mais resilientes, descentralizadas e orientadas pela comunidade.

Dimensões sociotécnicas

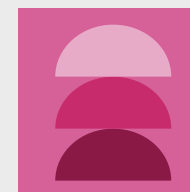
A implantação da IA em sistemas energéticos levanta questões importantes de governança e ética:

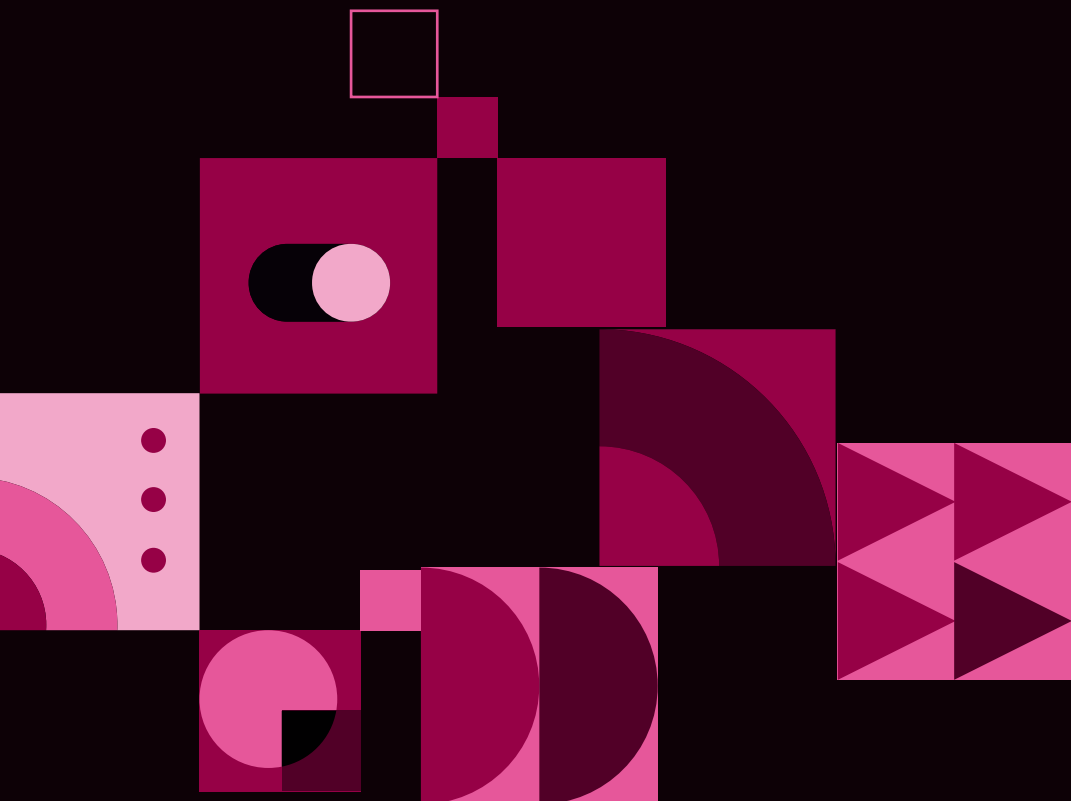
- **Princípios Éticos:** Estruturas de IA responsável exigem transparência, justiça e supervisão humana em sistemas de IA relacionados à energia (Reco-



mendação da UNESCO sobre a Ética da IA, citada em diversos documentos globais de políticas).

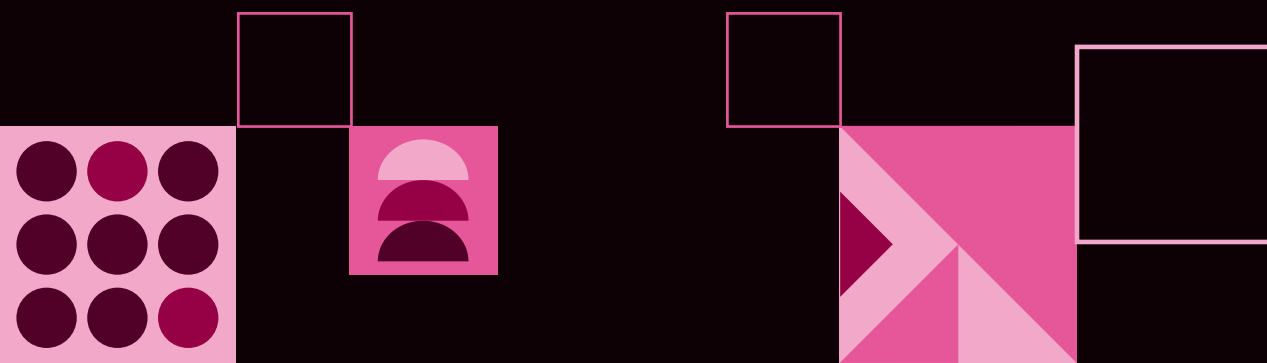
- **Responsabilidade Algorítmica:** No contexto energético, isso significa garantir que decisões automatizadas, como priorização de carga, detecção de falhas ou resposta a interrupções, sejam explicáveis, auditáveis e não marginalizem inadvertidamente comunidades vulneráveis (The Maybe, Where Cloud Meets Cement, 2025; Microsoft, AI for Sustainability Playbook). Esforços recentes para melhorar a responsabilidade incluem o desenvolvimento de padrões para relatar o consumo de energia e a pegada de carbono de modelos de IA. Por exemplo, a Hugging Face, juntamente com colaboradores, criaram o ranking AI Energy Score, que classifica modelos de IA com base em seu consumo estimado de energia e emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida. Essa iniciativa de transparência promove inovação responsável ao ajudar desenvolvedores, formuladores de políticas e usuários a compreender melhor os custos ambientais da implantação da IA (Lacoste et al., 2024).





03

Tendências em IA & energia



3. Tendências em IA & energia



Compreender o papel crescente da IA ao longo da cadeia de valor da energia — desde a extração de recursos (*upstream*) e transformação e transporte de energia (*midstream*) até a distribuição e consumo (*downstream*) — é fundamental para orientar transições energéticas sustentáveis. A abordagem baseada na cadeia de valor permite uma avaliação abrangente da sustentabilidade e eficiência em todas as etapas da produção e uso de energia (Rojek et al., 2025). Essa perspectiva integrada é essencial para identificar oportunidades e riscos associados à implementação da IA, particularmente no contexto da região ALC.

A IA é uma tecnologia ampla e transversal que desempenha um papel crítico como facilitadora da transformação dos sistemas energéticos, ao lidar com complexidades no planejamento, operação e otimização dos sistemas elétricos, além de apoiar a eletrificação. A eletrificação, que permite substituir tarefas que utilizam combustíveis fósseis por eletricidade, é essencial para a transição energética, pois melhora a eficiência e amplia o uso de fontes de energia verde. A IA pode acelerar e expandir a eletrificação em setores como transporte, indústria e imóveis.

Uma revisão de mais de 250.000 publicações sobre aplicações de IA na indústria elétrica entre 1982 e 2022 mostra uso significativo em todos os segmentos da cadeia de valor da energia, com a maior participação

relacionada ao varejo de energia (*downstream* 55%), seguida por redes de transmissão (*midstream* 14%) e geração de energia (*upstream* 13%) (Heymann et al., 2024).

Com base nessas tendências, esta seção apresenta uma visão geral de paradigmas emergentes, casos de uso regionais e considerações socio-técnicas-chave. Com base em estudos recentes, estimativas disponíveis e experiências práticas na ALC, destaca o potencial transformador da implantação da IA ao longo da cadeia de valor da energia, bem como os desafios que a acompanham.

3.1. IA para otimização energética: Capacidades em evolução e limites

As tecnologias impulsionadas por IA estão revolucionando a otimização energética por meio de análises preditivas, monitoramento em tempo real e sistemas dinâmicos de resposta à demanda. Essas ferramentas aumentam a eficiência operacional, a confiabilidade, a resiliência e a relação custo-benefício (Biswas et al., 2024). Elas também viabilizam sistemas de monitoramento de energia em tempo real, essenciais para rastrear e controlar



o uso de energia de forma eficaz, reduzir custos e mitigar impactos ambientais (Mischos et al., 2023).

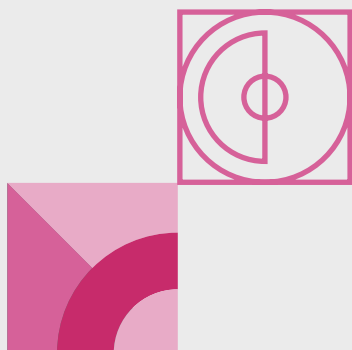
Em contextos urbanos, a IA é cada vez mais aplicada a sistemas energéticos de cidades inteligentes. Rojek et al. (2025) mostram que algoritmos avançados de deep learning podem melhorar a eficiência energética urbana ao analisar dados de sensores para prever demanda e equilibrar cargas, o que é crítico para o desenvolvimento urbano sustentável. Na América Latina, modelos de previsão baseados em IA já orientam decisões sobre investimentos e operações de redes, reduzindo o desperdício de energia renovável e melhorando a estabilidade da rede, como demonstrado pelo sistema de redes inteligentes (*smart grids*) do Chile (IEA, Energy and AI, 2025).

No nível da infraestrutura, empresas estão aproveitando a IA para aumentar a eficiência operacional. Por exemplo, o DeepMind do Google reduziu em 40% o consumo de energia para resfriamento de data centers aplicando aprendizado por reforço profundo para otimizar o desempenho do sistema. O sistema de IA do Google, treinado com dados históricos operacionais, analisava continuamente condições ambientais e energéticas para recomendar ajustes em tempo real nas configurações de resfriamento (Melguizo et al., 2025; Evans & Gao, 2016). A IA também apoia melhorias no desempenho das redes, incluindo previsão de demanda em tempo real, detecção de falhas e estabilização da rede, essenciais para gerenciar fontes descentralizadas e renováveis (IEA, World Energy Investment, 2025).

Apesar desses avanços, permanecem desafios, incluindo adoção desigual da IA devido à infraes-

trutura digital inadequada, baixa qualidade de dados e expertise regional limitada. Essas restrições destacam a necessidade de investimentos direcionados em tecnologia e capacitação. Do ponto de vista regulatório, os *frameworks* estão evoluindo para incentivos baseados em desempenho que recompensam a otimização das redes, aumentando a eficiência e a confiabilidade e reduzindo perdas — fatores-chave para a implantação eficaz e equitativa da IA (IEA, World Energy Investment, 2025).

Nesse cenário em transformação, a IA está surgindo como facilitadora da conformidade regulatória. Algoritmos avançados podem incorporar requisitos de políticas — como padrões de portfólio renovável, precificação de carbono e mandatos de confiabilidade — diretamente na tomada de decisão operacional. Por exemplo, estudos recentes mostram que o NSGA-III, um algoritmo multiobjetivo projetado para equilibrar trade-offs entre eficiência econômica, flexibilidade da rede e padrões regulatórios, pode ajudar operadores a lidar com essas metas frequentemente conflitantes (Ding et al., 2025). Ao incorporar restrições regulatórias nos modelos de otimização, em vez de tratá-las como ajustes pós-implementação, a IA alinha ganhos de eficiência com objetivos de políticas públicas, fortalecendo a responsabilidade e acelerando a transição energética.



BOX 1 – REDE INTELIGENTE MELHORADA COM IA NO CHILE

O Chile integra de forma eficaz modelos de previsão de energia renovável impulsionados por IA, otimizando significativamente seus recursos renováveis, reduzindo as emissões e oferecendo um modelo para modernização sustentável das redes na região (IEA, 2024).

O Coordenador Eléctrico Nacional (CEN) fez uma parceria com a Tapestry, uma iniciativa de IA da X (antiga Google X), para transformar seu planejamento de expansão de transmissão de longo prazo. Ao incorporar IA no processo anual de planejamento do CEN, a ferramenta permite que os planejadores simulem dezenas de cenários de demanda e renováveis em paralelo, reduzindo os tempos de computação em 86% e oferecendo muito mais flexibilidade para antecipar incertezas.

Essa inovação fortalece a capacidade do Chile de alinhar investimentos em infraestrutura com sua ambiciosa trajetória de descarbonização, fornecendo um exemplo concreto de como a IA pode simultaneamente melhorar o desempenho operacional e o planejamento orientado por regulamentações para a modernização sustentável das redes na América Latina (X, 2025).

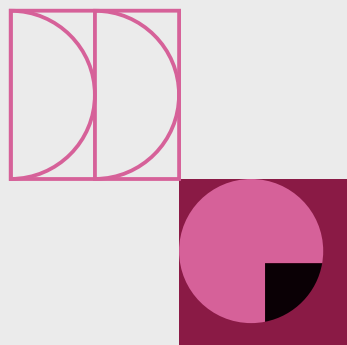
3.2. Efeitos da IA sobre o consumo de energia: Nova demanda

Embora a IA tenha um potencial significativo para otimizar sistemas energéticos, sua rápida expansão também está gerando uma demanda substancial por eletricidade, levantando questões importantes sobre o impacto líquido da IA na sustentabilidade. Quantificar quanto dessa demanda elétrica é atribuível aos sistemas de IA continua sendo difícil, pois a maior parte do consumo de energia relacionado à IA ocorre hoje em grandes data centers em nuvem e hiperescaláveis, onde acontecem tanto o treinamento quanto a inferência dos modelos (Kaack et al., 2022).

Diante do rápido crescimento da potência computacional necessária para o treinamento, os data centers que hospedam execuções de IA em larga escala representam desafios significativos para a demanda energética e o planejamento de infraestrutura, bem como para formuladores de políticas que buscam acomodar o aumento do consumo enquanto avançam nas metas de descarbonização. À medida que essas instalações se tornam um componente fundamental do ecossistema de IA, garantir seu alinhamento com a transição para energia limpa será crítico para determinar se a IA contribui ou prejudica os objetivos globais de sustentabilidade (Pilz, Mahmood & Heim, 2025).

Dois fatores dificultam estimativas precisas da demanda energética impulsionada pela IA:

Primeiro, embora os data centers atualmente concentrem a maior parte do uso de energia da IA, eles representam apenas o nó central de uma pegada energética



crescente e distribuída, já que a inferência ocorre cada vez mais em bilhões de dispositivos e aplicações (GSMA Intelligence, 2025). Em geral, os sistemas de IA distribuem o consumo elétrico entre processamento de dados, treinamento e inferência — o processo de usar um modelo treinado para fazer previsões sobre novos dados. O treinamento e o processamento em larga escala nos data centers respondem atualmente pela maior parte do uso de eletricidade relacionado à IA; a inferência deve se tornar o principal motor da demanda à medida que é incorporada a milhões de aplicações cotidianas e os modelos se tornam maiores e mais complexos (Zewe, 2025). O consumo elétrico por consulta durante a inferência pode variar amplamente dependendo de fatores como tamanho do modelo, comprimento de entrada e saída, modalidade (texto, imagem ou vídeo), eficiências algorítmicas e tipo de hardware utilizado (IEA, Energy and AI, 2025). Alguns estudos estimam que gerar uma resposta de IA pode consumir muitas vezes mais eletricidade do que uma busca convencional na web, com uma análise sugerindo até 60–70 vezes mais energia para modelos de grande escala como BLOOM ou GPT-3 (Vanderbauwhede, 2025). Essa mudança tornará o consumo de energia mais disseminado e menos centralizado, já que a inferência ocorre em inúmeras interações de usuários, e não apenas em instalações especializadas.

Segundo, mesmo dentro dos data centers, as cargas de trabalho de IA representam apenas parte da demanda total. Distinguir eletricidade usada por IA e não-IA é cada vez mais difícil, e não existe um conjunto de dados abrangente que capture a participação de cada uma. Há uma ampla gama de estimativas (IEA, Energy and AI, 2025). Um indicador é o uso de servido-

res acelerados¹, que representaram 24% da demanda elétrica dos servidores e 15% da demanda total dos data centers em 2024 (IEA, Energy and AI, 2025). Considerando esses fatores, a RAND projeta que os data centers de IA podem exigir capacidade adicional de 10 gigawatts (GW) até o final de 2025, chegando a 68 GW em 2027 — quase o dobro das necessidades globais de energia dos data centers em 2022 (Pilz et al., 2025). Apesar desse crescimento rápido, os data centers ainda representam uma parcela relativamente modesta do consumo global de eletricidade: a IEA estima que eles responderam por 1,5% da demanda global — cerca de 415 terawatts-hora (TWh) — em 2024 (IEA, Energy and AI, 2025), ao passo em que a Deloitte projeta que isso chegará a 2% (536 TWh) em 2025. No entanto, se o treinamento e a inferência de IA generativa, intensivos em energia, continuarem a se expandir exponencialmente, o consumo total dos data centers pode atingir 1.065 TWh até 2030 (Deloitte, 2024).

Na ALC, a Organização Latino-Americana de Energia (OLADE) informa que existem 455 data centers relacionados à IA. Em 2023, seu uso de eletricidade representou cerca de 1,6% da demanda total da região². A OLADE projeta que, até 2035, a IA poderá responder por cerca de 5% da demanda regional, equivalente a mais de 120 TWh (OLADE, 2025).

Esse aumento na demanda elétrica está intensificando a pressão sobre as redes de energia e acelerando a necessidade de investimento em geração elétrica de baixo carbono, infraestrutura de rede e capacidade de transmissão.



3. 3. Balanço líquido de emissões da IA: Aumentos vs. reduções

As emissões fornecem um indicador mensurável e relevante para políticas para avaliar se a IA atua principalmente como facilitadora da descarbonização ou como fator de estresse para metas de sustentabilidade. Segundo a IEA (IEA, Energy & AI 2025), o impacto geral da IA nos resultados climáticos depende do equilíbrio entre três forças: (i) aumentos diretos nas emissões, (ii) ganhos de eficiência e inovação e (iii) efeitos de rebote.

Como observado na Seção 3.2 sobre nova demanda, a IA já está remodelando o consumo de energia por meio da rápida expansão dos data centers. A IEA estima que o uso de eletricidade nessas instalações respondeu por cerca de 180 MtCO₂ em 2024, aproximadamente 0,5% das emissões atuais relacionadas à combustão³. Para 2035, a IEA define dois cenários: no caso base, as emissões devem subir para 300 MtCO₂, enquanto no cenário “Lift-Off”, refletindo uma adoção mais rápida da IA, podem chegar a 500 MtCO₂.⁴ Embora esses números permaneçam abaixo de 1,5% das emissões globais de energia, seu rápido crescimento destaca a urgência de obter essa eletricidade de fontes limpas.

Ao mesmo tempo, a IA pode reduzir emissões ao melhorar a eficiência em vários processos, conforme discutido na Seção 3.1 sobre IA para otimização energética. Essas melhorias também podem se traduzir em reduções mensuráveis de emissões. Stern et al. (2025) estimam que, até 2035, aplicações de IA em apenas três áreas (sistemas elétricos, mobilidade e produção de alimentos) podem reduzir as emissões globais em 3.200–5.400 MtCO₂ por ano em relação ao cenário de negó-

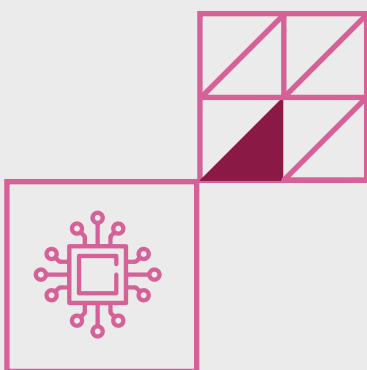
cios como de costume. Em linha com isso, a IEA projeta que a implantação generalizada das aplicações existentes de IA pode reduzir as emissões em cerca de 5% do total das emissões relacionadas à energia até 2035.

No entanto, os efeitos de rebote podem compensar parte desses ganhos. Ganhos de eficiência da IA nem sempre se traduzem em cortes absolutos de emissões. Em alguns casos, podem incentivar maior uso de energia⁵. Embora ainda não existam estimativas globais ou regionais robustas sobre a magnitude desses efeitos, tanto a IEA quanto Stern et al. (2025) os destacam como riscos importantes que podem reduzir os benefícios líquidos da IA para o clima.

Em geral, as evidências atuais sugerem que o potencial da IA para reduzir emissões pode superar os aumentos decorrentes de seu uso de energia (Stern et al., 2025), mas o equilíbrio permanece incerto. A medida em que a IA se tornará uma contribuição líquida para a descarbonização dependerá de políticas que orientem sua implantação para aplicações de alto impacto, da rápida expansão da energia limpa e de estruturas de governança que alinhem seu crescimento às metas de descarbonização.

3. 4. Energia limpa: Mudança de paradigmas

O rápido crescimento da IA destaca a necessidade de repensar estratégias energéticas em torno de fontes limpas e escaláveis que possam acompanhar a demanda acelerada.



Nesse contexto, novos paradigmas para o desenvolvimento de energia renovável estão surgindo globalmente. Na ALC, essa é uma tendência especialmente promissora, dada a abundância de potencial solar, eólico e hidrelétrico na região. A meta regional de atingir 70% de eletricidade renovável até 2030 reflete o crescente impulso político para o desenvolvimento de baixo carbono (Meza & Perez, 2022). Embora a hidreletricidade continue sendo um pilar, países como Brasil e Uruguai expandiram significativamente a capacidade eólica, e o Chile está ampliando rapidamente a geração solar, aproveitando a irradiância excepcional do Deserto do Atacama (IEEE, 2022). Essas mudanças são apoiadas por instrumentos de política como leilões de energia limpa e incentivos de acesso à rede (Giraldo, 2023), que atraíram investimentos e aceleraram a implantação, contribuindo para a estabilidade da rede.

Globalmente, grandes desenvolvedores de IA também estão redefinindo modelos de energia limpa. Empresas de tecnologia tornaram-se os maiores compradores corporativos de renováveis, muitas vezes por meio de contratos de compra de energia (PPAs) de longo prazo e investimentos diretos em infraestrutura de energia limpa (Amazon, 2024; BloombergNEF, 2023). Nos Estados Unidos, o setor de tecnologia respondeu por 92% das novas compras de energia limpa em 2024, um aumento amplamente impulsionado pela expansão da IA e dos data centers (Luccioni, 2025). Empresas como Microsoft, Google, Amazon e Meta estão cada vez desenvolvendo novos data centers em colocation e com fontes dedicadas de energia limpa — solar, eólica, geotérmica ou nuclear — para garantir um fornecimento confiável de eletricidade de baixo carbono (IEA, Energy and AI, 2024).

BOX 2 – INDÚSTRIA DE TECNOLOGIA IMPULSIONANDO A INOVAÇÃO EM ENERGIA LIMPA

Iniciativas recentes mostram como os principais desenvolvedores de IA estão investindo diretamente em fontes de energia mais limpas e confiáveis para abastecer sua infraestrutura digital em rápida expansão.

- Para garantir eletricidade livre de carbono, a Microsoft assinou um contrato de compra de energia de longo prazo com a Constellation Energy para 100% da produção da usina nuclear do Crane Research Center, nos Estados Unidos.
- O Google está explorando abordagens mais experimentais, incluindo pequenos reatores nucleares modulares e projetos geotérmicos de próxima geração. Por meio de sua colaboração com a Fervo Energy em Nevada, o Google está demonstrando como tecnologias avançadas de perfuração podem desbloquear novos recursos geotérmicos econômicos para abastecer infraestrutura digital em larga escala (IEA, Energy and AI, 2025).

3. 5. Data centers: Uma nova agenda público–privada

A rápida expansão dos data centers na América Latina e no Caribe (ALC) está remodelando o cenário digital da região. À medida que computação em nuvem, IA e tecnologias de borda proliferam, os países estão po-

sicionando os data centers como infraestrutura crítica para a modernização econômica e a soberania tecnológica. Governos estão oferecendo incentivos fiscais, subsídios energéticos e processos acelerados de licenciamento para atrair players globais, com o objetivo de transformar seus países em polos digitais regionais (IEA, World Energy Investment, 2025).

No entanto, esse crescimento traz um novo conjunto de desafios de governança, particularmente na interseção entre energia, infraestrutura local e equidade. Conforme discutido na Seção 3.2, os data centers ainda representam uma parcela relativamente pequena das emissões totais, mas seu consumo de eletricidade está entre os que mais crescem globalmente (IEA, 2025). Em regiões onde as redes elétricas já estão sobrecarregadas ou dependem fortemente de combustíveis fósseis, a expansão não regulamentada dessas instalações pode aumentar as emissões e aprofundar desigualdades energéticas existentes (The Maybe, 2025). Além disso, muitas comunidades que abrigam data centers veem benefícios econômicos ou sociais limitados, além de empregos temporários na construção, levantando questões sobre justiça distributiva e sustentabilidade de longo prazo (The Maybe, 2025).

Abordar essas questões exigirá uma nova agenda público-privada centrada na transparência, no desempenho ambiental e na participação comunitária. Medidas-chave incluem relatórios regulares sobre uso de energia e água, investimentos para fortalecer a resiliência da rede e vinculação de incentivos públicos a benefícios comunitários tangíveis e mensuráveis, como capacitação da força de trabalho, infraestrutura compartilhada e integração de energia renovável. Alinhar o

desenvolvimento de data centers às estratégias nacionais de descarbonização e às metas de inclusão digital pode ajudar a garantir que essas instalações contribuam para objetivos mais amplos de desenvolvimento e clima (IEA, Energy and AI – Analysis, 2025).

BOX 3 – TECHHUB DE QUERÉTARO, MÉXICO

Querétaro tornou-se rapidamente um polo de investimento em data centers, com grandes empresas como Microsoft e Amazon anunciando instalações multimilionárias. A base industrial do estado, a proximidade com a Cidade do México e políticas e incentivos governamentais proativos atraíram interesse global. No entanto, grupos da sociedade civil levantaram preocupações sobre escassez de água e uso do solo, especialmente em zonas semiáridas. Em resposta, as autoridades locais começaram a avaliar métricas de impacto ambiental e mecanismos de consulta comunitária (The Maybe, 2025).

3. 6. Participação comunitária: Oportunidades para o desenvolvimento local sustentável

À medida que a infraestrutura digital se expande, cresce também a oportunidade para que as comunidades assumam um papel mais ativo na definição das tecnologias que impactam suas vidas. No contexto da IA

e dos sistemas energéticos, a participação comunitária não é apenas um objetivo normativo — é essencial para projetar soluções resilientes, justas e sensíveis ao contexto (IEA, Energy and AI – Analysis, 2024).

As comunidades locais, especialmente aquelas à margem do acesso formal à energia ou aos serviços digitais, trazem conhecimentos críticos sobre ecossistemas locais, necessidades e dinâmicas sociais contextuais, além das realidades do dia a dia. Quando envolvidas de forma significativa, podem contribuir para o desenho e a governança dos sistemas energéticos, desde a identificação de áreas prioritárias para implantação de *microgrids* até a cocriação de métricas e indicadores para monitoramento ambiental e impacto social. Em sistemas habilitados por IA, isso também significa envolver os residentes em questões sobre governança de dados, privacidade e responsabilidade algorítmica, especialmente em projetos que envolvem sensores, medidores inteligentes ou infraestruturas públicas de dados (Melguizo et al., 2025).

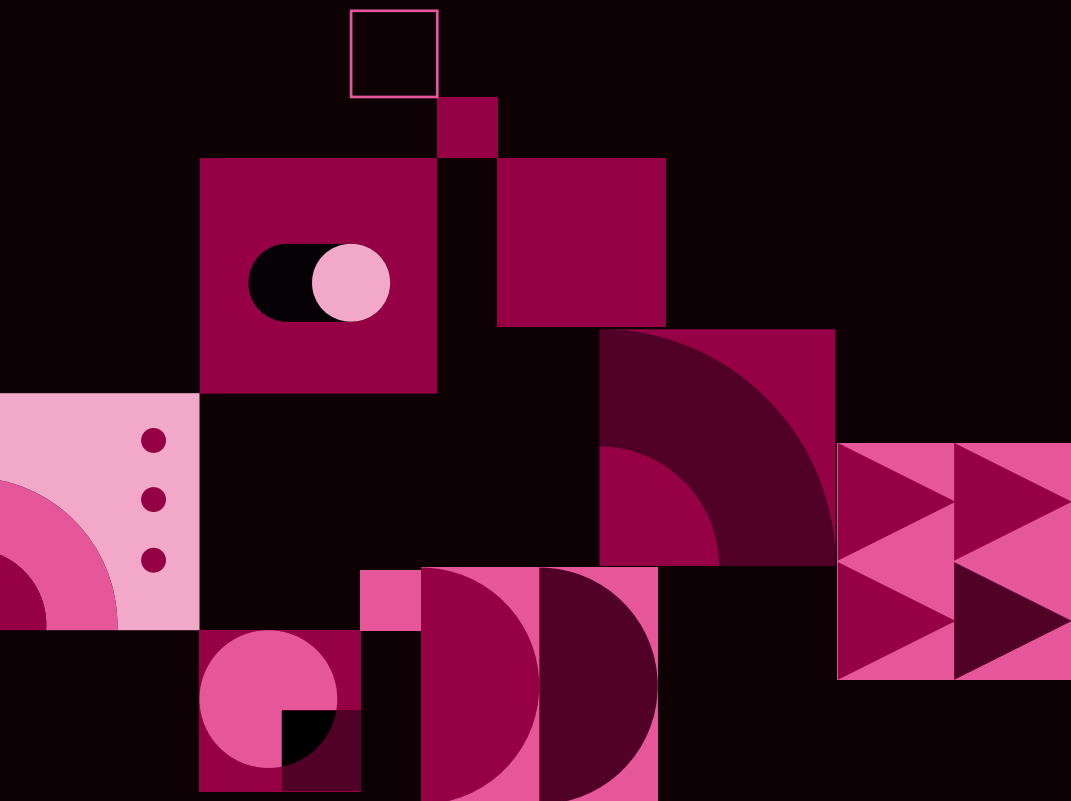
Modelos de governança energética participativa já estão tomando forma. No Brasil, cooperativas solares lideradas por comunidades estão experimentando ferramentas de monitoramento baseadas em IA para otimizar o desempenho e compartilhar economias de energia (Microsoft, AI for Sustainability Playbook, 2024). Fora da ALC, em um contexto do Sul Global, estão sendo desenvolvidos *frameworks* na Nigéria para integrar comunidades indígenas e combinar tecnologias digitais com conhecimentos ecológicos tradicionais para monitorar mudanças no uso da terra e garantir que o desenvolvimento energético não comprometa a integridade cultural ou ambiental (Abiodun et al., 2024).

Para tornar essa forma de participação uma prática padrão, as políticas devem garantir que os mecanismos de engajamento sejam genuinamente inclusivos, e não extrativos ou simbólicos. Isso requer alocação de tempo e recursos para capacitação, tradução de informações técnicas em formatos acessíveis e incorporação de práticas de co-design nos processos de aquisição e planejamento. Em última análise, abordagens orientadas pela comunidade fortalecem não apenas a legitimidade e a inclusão, mas também a sustentabilidade e a eficiência de longo prazo dos sistemas de energia e IA.

BOX 4 – COMPROMISSO COMUNITÁRIO COM DATA CENTERS

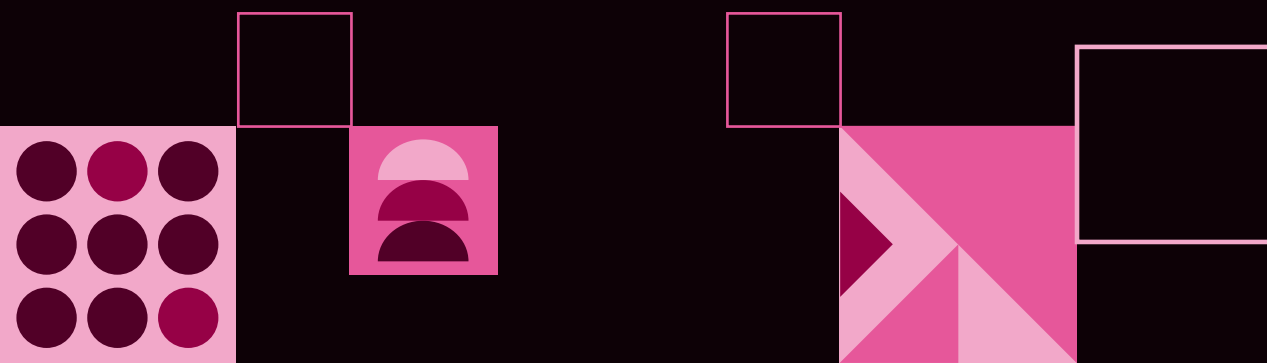
Em junho de 2024, a Microsoft lançou o Datacenter Community Pledge, um compromisso global para garantir que a rede crescente de data centers da empresa gere resultados ambientais e sociais positivos nas comunidades onde atua. O compromisso é estruturado em três pilares:

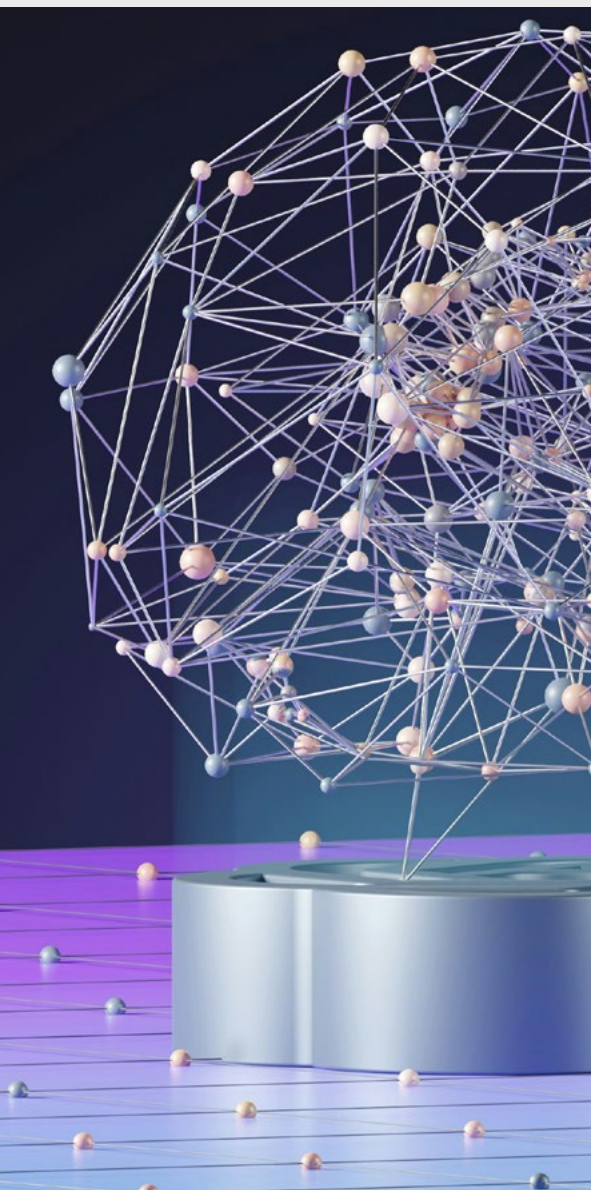
- Sustentabilidade — visando operações carbono-negativas, positivas em água e com desperdício zero até 2030
- Prosperidade comunitária — criação de empregos, oferta de treinamentos e expansão de iniciativas de capacitação digital.
- Operações responsáveis — parceria com stakeholders locais e minimização de impactos como ruído, iluminação e perturbação de ecossistemas (Walsh, 2024).



04

Recomendações e orientações para pesquisas futuras





4. Recomendações e orientações para pesquisas futuras

A integração da IA nos sistemas energéticos apresenta oportunidades transformadoras e desafios urgentes, destacando a responsabilidade do setor de energia em atender às exigências de infraestrutura e emissões necessárias para aproveitar a IA de forma eficaz. Este documento explorou como a IA pode otimizar o uso de energia, apoiar a descarbonização e promover novos modelos participativos, alertando para os riscos do crescimento descontrolado de infraestrutura intensiva em energia e lacunas de governança. Com base nessas conclusões, são apresentadas as seguintes recomendações e caminhos para pesquisas futuras.

Recomendações de políticas e práticas

1. Promover transparência e responsabilidade nos sistemas IA-energia. Formuladores de políticas devem estabelecer padrões claros de relatórios sobre consumo de energia e pegada de carbono das aplicações de IA, especialmente em áreas de alto impacto, como data centers e modelagem preditiva. Esses padrões devem garantir relatórios consistentes, comparáveis e precisos entre regiões e setores, incluir participação de diversos stakeholders e orientar

efetivamente o desenvolvimento da IA alinhado ao clima (IEA, Energy and AI – Analysis, 2025).

2. Alinhar infraestrutura digital às metas climáticas e de justiça. Incentivos para IA e infraestrutura de dados devem estar vinculados a benefícios locais, integração de energia renovável e salvaguardas ambientais. Parcerias público-privadas devem incorporar criação de valor social, incluindo desenvolvimento da força de trabalho, reinvestimento comunitário e equidade de gênero como métricas centrais de sucesso (The Maybe, 2025; IEA, 2025).

3. Institucionalizar participação comunitária e cogovernança. Governos e setor privado devem incorporar mecanismos participativos no planejamento energético habilitado por IA, garantindo que comunidades marginalizadas tenham voz na coleta de dados, tomada de decisão algorítmica e alocação de recursos (Melguizo et al., 2025).

4. Fortalecer capacidade regional e compartilhamento de conhecimento. Construir capacidade técnica e de governança no Sul Global é essencial. Prioridades incluem fomentar colaboração Sul-Sul, desenvolver ferramentas open source e apoiar experimentação liderada localmente

para reduzir dependência e promover soluções específicas ao contexto (Microsoft, 2024).

5. Exigir desenvolvimento de cenários padronizados de emissões da IA. Cenários comuns devem capturar tanto o crescimento da demanda energética relacionada à IA quanto possíveis caminhos de descarbonização. Esses modelos devem refletir combinações regionais de redes, restrições de infraestrutura e efeitos de rebote para fornecer projeções realistas. Incorporar tais cenários nos processos de planejamento climático permitiria políticas mais proativas que alinhem a implantação da IA aos compromissos de neutralidade de carbono (Luers et al., 2024).

Orientações para pesquisas futuras

Embora aplicações promissoras da IA na energia estejam surgindo, permanecem lacunas significativas de conhecimento. Avançar nesse campo requer pesquisas direcionadas que priorizem equidade, sustentabilidade e inovação sensível ao contexto, especialmente em regiões e comunidades sub-representadas.

- **Modelos grandes vs. modelos enxutos:** Pesquisas futuras devem aprofundar análises comparativas entre data centers intensivos em recursos e modelos computacionais mais enxutos, destacando trade-offs em eficiência, equidade e sustentabilidade.
- **Perspectivas lideradas pelo Sul Global:** É necessária maior documentação sobre inovações comunitárias

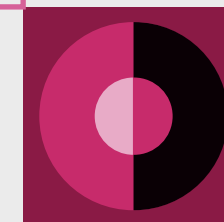
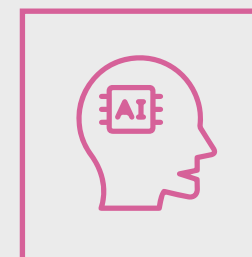
e indígenas em sistemas IA-energia na América Latina, África e Sudeste Asiático (Melguizo et al., 2025).

- **Sustentabilidade do ciclo de vida da IA:** Análises mais profundas do ciclo de vida são essenciais para entender os trade-offs entre benefícios da IA e seus impactos ambientais, desde hardware até questões de dados (Luccioni et al., 2023).
- **Impactos sociais e de gênero:** Pesquisas devem examinar como a IA na energia mitiga ou agrava desigualdades existentes, especialmente relacionadas a gênero, acesso rural e pobreza energética (Global Green Skills Report, 2024).
- **Estruturas éticas e legais:** Estudos comparativos sobre responsabilidade algorítmica, soberania energética e direitos de dados podem ajudar a desenvolver modelos regionais de governança da IA alinhados à sustentabilidade (UNESCO, 2021; The Maybe, 2025).

A convergência entre IA e energia oferece uma oportunidade para avançar no desenvolvimento sustentável, se guiada por equidade, responsabilidade e visão de futuro. À medida que a ALC expande suas infraestruturas digitais e energéticas, os países podem traçar um caminho inclusivo, transparente e alinhado ao clima para a integração da IA. Ao fundamentar a inovação no conhecimento local, permitir a participação comunitária na governança e alinhar o desenvolvimento tecnológico às prioridades sociais e ecológicas, a região pode liderar na construção de um futuro de IA que sirva ao interesse público.

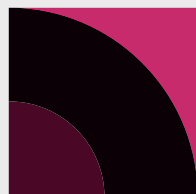
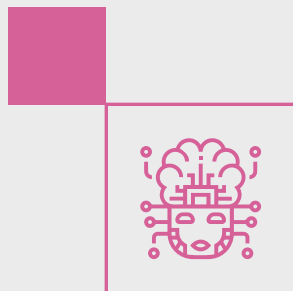
Notas finais

- 1 De acordo com a IBM, servidores acelerados utilizam hardware especializado, como unidades de processamento gráfico (GPUs), circuitos integrados específicos para aplicações (ASICs) ou matrizes de portas programáveis em campo (FPGAs), para executar tarefas de forma mais rápida e eficiente do que as unidades centrais de processamento tradicionais (CPUs). Ao depender da computação paralela, eles são essenciais para aplicações avançadas, incluindo IA, IA generativa, aprendizado de máquina e computação de alto desempenho.
- 2 Com base na média global de consumo de energia por centro.
- 3 Segundo a IEA (2025), as emissões globais totais de CO₂ provenientes da combustão de combustíveis são estimadas em cerca de 35 bilhões de toneladas métricas em 2024.
- 4 Para mais detalhes sobre esses dois cenários, consulte o Capítulo 2 do relatório Energy & AI 2025 da IEA.
- 5 Por exemplo, custos mais baixos na produção de combustíveis fósseis possibilitados pela IA podem incentivar maior extração, e o crescimento dos veículos autônomos pode afastar as pessoas do transporte público, aumentando a demanda por transporte e as emissões.



Referências

- Abiodun et al. (2024) Harnessing Indigenous Knowledge and Modern Technology for Sustainable Development in Southwest Nigeria: Addressing Environmental Challenges
- Amazon. (2024, January). Amazon's renewable energy portfolio update. <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-renewable-energy-portfolio-january-2024-update>
- Biswas, P., Rashid, A., Biswas, A., & Others. (2024). AI-driven approaches for optimizing power consumption: A comprehensive survey. *Discover Artificial Intelligence*, 4, 116. <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00211-7>
- BloombergNEF. (n.d.). Tech firms seal US dominance in corporate clean power purchasing. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/tech-firms-seal-us-dominance-in-corporate-clean-power-purchasing/>
- Deloitte. (2024). As generative AI asks for more power, data centers seek more reliable, cleaner energy solutions. Deloitte Insights. Available at: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2025/genai-power-consumption-creates-need-for-more-sustainable-data-centers.html>
- Ding, C. X., Zhong, S., Li, S., & Alhazmi, M. (2025). Regulatory-driven optimization of integrated energy systems: A legal and policy-compliant framework for flexibility and carbon management. *Energy Reports*, 14, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.05.048>
- Giraldo Vélez, C. E. (2023). Green power markets in Latin America: Experiences and trends [Working paper]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/83066/1037369753.2023.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- GSMA Intelligence. (2025). Distributed inference: How AI can turbocharge the edge. GSMA Intelligence. <https://www.gsmainelligence.com/research/distributed-inference-how-ai-can-turbocharge-the-edge>
- Heymann, F., Quest, H., Lopez Garcia, T., Ballif, C., & Galus, M. (2024). Reviewing 40 years of artificial intelligence applied to power systems – A taxonomic perspective. *Energy and AI*, 15, 100322. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100322>
- IEA (2025), Energy and AI, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>, Licence: CC BY 4.0
- IEA (2025), World Energy Investment 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2025>, Licence: CC BY 4.0
- Kaack, L. H. et al. (2022), Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. *Nature Climate Change*, vol. 12(6), pp. 518–527, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7>
- Lacoste, A., Luccioni, A. S., Schmidt, V., Lê, L., & Hugging Face Team. (2024). AI Energy Score: An Open Leaderboard for Energy and



Emissions of AI Models. Hugging Face. <https://huggingface.github.io/AIEnergyScore/#faq>

Lambertini, M. (2023, October 28). How do we achieve nature positive? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ZIPHGImaFHM>

Lebdioui, A. Melguizo, Á., & Muñoz, V. (2025). Artificial intelligence, biodiversity & energy: From a resource-intensive to a symbiotic tech (TIDE Working Paper No. 90). Oxford TIDE. https://www.thegovlab.org/static/files/tide-working-paper-90_-ai-biodiversity-and-energy5.pdf

Luccioni, A. S., Schmidt, V., Lacoste, A., & Lê, L. (2023). Quantifying the carbon emissions of AI. Hugging Face & Mila. <https://huggingface.co/blog/emissions>

Luers, A., Koomey, J., Masanet, E., Gaffney, O., Creutzig, F., Lavista Ferres, J., & Horvitz, E. (2024, April 22). Will AI accelerate or delay the race to net-zero emissions? *Nature*, 628, 718–720. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-01137-x>

Luo, Z., Lin, X., Wu, Y., & Zhong, W. (2024). Role of energy value chain in carbon neutrality: A review. *Clean Energy Science and Technology*, 2(4), 192. <https://doi.org/10.18686/cest.v2i4.192>

Melguizo, L., Jung, J., & Katz, R. (2025). AI & energy: Exploring the intersection of digital infrastructure, sustainability, and governance in Latin America and the Caribbean. Oxford TIDE. https://oxford-tide.org/wp-content/uploads/2025/06/ai_energy_melguizo_jung_katz_0805_rev06.pdf

Meza, V., & Perez, E. (2022). The Role of Artificial Intelligence in Latin America's Energy Transition. *IEEE Latin America Transactions*, 20 (11), 2404–2412. <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.6829>

Microsoft. (2024). AI for sustainability playbook. <https://www.microsoft.com/corporate-responsibility/sustainability/ai>

Mischos, S., Dalagdi, E., & Vrakas, D. (2023). Intelligent energy management systems: A review. *Artificial Intelligence Review*, 56, 11635–11674. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441-3>

Neri, H., & Domingos Cordeiro, V. (2025). Navigating the double divide: Generative AI and the dynamics of inequality in Latin America. *ProtoSociology*, 40, 342. <https://doi.org/10.5840/protosociology20234018>

Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2025). By 2035, artificial intelligence will demand 5% of the electricity consumed in Latin America and the Caribbean. OLADE. <https://www.olade.org/en/editoriales/march-2025by-2035-artificial-intelligence-will-demand-5-of-the-electricity-consumed-in-latin-america-and-the-caribbean/>

Pilz, K. F., Mahmood, Y., & Heim, L. (2025). AI's power requirements under exponential growth: Extrapolating AI data center power demand and assessing its potential impact on U.S. competitiveness (RAND Report RRA3572-1). RAND Corporation. <https://www.rand.org/t/RR3572-1>

Rojek, I., Mikołajewski, D., Galas, K., & Piszcz, A.

(2025). Advanced deep learning algorithms for energy optimization of smart cities. *Energies*, 18(2), 407. <https://doi.org/10.3390/en18020407>

Stern, N., Romani, M., Pierfederici, R. et al. (2025). Green and intelligent: the role of AI in the climate transition. *npj Climate Action* 4, 56. <https://doi.org/10.1038/s44168-025-00252-3>

The Maybe. (2025). Data center report: Where cloud meets cement. <https://www.themaybe.org/research/data-center-report-where-cloud-meets-cement>

Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., Jen, T.-C., & Madyira, D. M. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & Environment*, 35(7), 3833–3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X241256293>

UNESCO. (2021). Recommendation on the ethics of artificial intelligence. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137>

U.S. Department of Energy. (2024, April). Artificial Intelligence Executive Order Report: Section 5.2g(i). https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-04/AI%20EO%20Report%20Section%205.2g%28i%29_043024.pdf

Vanderbauwhede, W. (2025). Estimating the increase in emissions caused by AI-augmented search. University of Glasgow. arXiv preprint arXiv:2407.16894. <https://arxiv.org/abs/2407.16894>

Walsh, N. (2024, June 2). Microsoft's Datacenter Community Pledge: To build and operate digital infrastructure that addresses societal challenges and creates benefits for communities. The Official Microsoft Blog. <https://blogs.microsoft.com/blog/2024/06/02/microsofts-datacenter-community-pledge-to-build-and-operate-digital-infrastructure-that-addresses-societal-challenges-and-creates-benefits-for-communities/17>

X (2024), How Tapestry Came to Support a Stronger, Cleaner Grid in Chile. <https://x.company/blog/posts/tapestry-cen-planning/>

Zewe, A. (2025, January 17). Explained: Generative AI's environmental impact. MIT News. <https://news.mit.edu/2025/explained-generative-ai-environmental-impact-0117>

