

Odu.Codes 2026

DECODIFICANDO CENÁRIOS TECNOLÓGICOS DO AMANHÃ

Decoding Tomorrow's Technological Scenarios

Impactos Futuros da
Convergência entre
Energia Avançada,
Inteligência Artificial e
Tecnologias Quânticas



**NARCELIO
RAMOS RIBEIRO**

Autor



**IGOR DANTAS DOS
SANTOS MIRANDA**

Autor

Revisão técnica:

LEONARDO SILVA DE SOUZA

$$|\psi\rangle = \sum c_i |i\rangle$$
$$\hat{H}|\psi\rangle = E|\psi\rangle$$

Esta publicação é uma iniciativa do Instituto Mancala (www.institutomancala.com), destinada a promover a compreensão, a apropriação e o desenvolvimento responsável de tecnologias emergentes por territórios e comunidades.

O texto discute como energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas estão se consolidando como tecnologias habilitadoras capazes de reorganizar a economia, a ciência, o trabalho, a gestão pública e a vida nos territórios. Mais do que analisar cada tecnologia isoladamente, destaca sua convergência e os impactos que essa combinação pode gerar na próxima década.

Também alerta que comunidades negras urbanas, comunidades tradicionais, pequenos municípios, educadores e organizações sociais não devem ser apenas receptores de soluções tecnológicas produzidas por outros. Ao contrário, precisam compreender, adaptar e orientar essas tecnologias a partir de seus próprios problemas, prioridades e projetos de futuro.

A mensagem central é que a apropriação tecnológica local depende de formação, governança de dados, projetos-piloto, redes de cooperação e participação social. O futuro tecnológico já está em disputa, e os territórios precisam participar ativamente de sua construção.

Palavras-chave: tecnologias habilitadoras; inteligência artificial; energia avançada; tecnologias quânticas; territórios; apropriação tecnológica local.

1 Por que este documento existe

Vivemos um momento importante na história. Estamos presenciando múltiplas tecnologias habilitadoras, resultantes de inovações ocorridas nos ecossistemas da nova matriz energética, das tecnologias quânticas e da inteligência artificial, caminhando para alcançar adoção ampla quase simultaneamente. Essas forças transformadoras parecem emergir em paralelo, prontas para remodelar sociedades, economias e culturas em escala global, impulsionadas por forças tecnológicas, econômicas, políticas, geopolíticas e ambientais.

Neste documento, essas forças serão tratadas como forças estruturais: fatores tecnológicos, econômicos, políticos, geopolíticos e ambientais que moldam a direção, a velocidade e a intensidade das transformações. Também chamaremos de sinais de futuro os acontecimentos concretos — descobertas, investimentos, protótipos, políticas públicas e aplicações emergentes — que indicam possíveis trajetórias para os próximos anos.

1.1 O momento histórico

Há momentos na história em que tudo muda: quando a forma como produzimos energia, nos comunicamos, nos deslocamos, trabalhamos e organizamos a sociedade muda ao mesmo tempo [1]. Foi assim no fim da Idade Média, nas grandes revoluções industriais e no avanço da economia digital. Cada uma dessas transformações não mudou apenas a tecnologia, mas o próprio tecido da sociedade.

Agora, o desafio é diferente. A simultaneidade dos avanços em tecnologias quânticas, inteligência artificial e tecnologias para a nova matriz energética, associada à possibilidade de alcançarem uso em larga escala em curto espaço de tempo, cria um ecossistema de inovação que não apenas acelera o ritmo das mudanças, mas também multiplica seus impactos em várias áreas da ciência, da economia, da política, da educação, do trabalho e da vida cotidiana.

1.2 A disputa pelo futuro

A pergunta não é se essas transformações vão acontecer. Elas já estão em curso. A pergunta é: quem vai compreendê-las a tempo de participar, orientar e liderar seus efeitos?

Tecnologias habilitadoras não são apenas instrumentos técnicos. Elas criam novas cadeias de valor, novos mercados, novas formas de organização, novos centros de poder e novas desigualdades, caso sejam apropriadas apenas por grandes empresas, potências globais e grupos com maior capacidade de investimento. Por isso, energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas também devem ser compreendidas como campos de disputa econômica, científica, geopolítica e territorial.

Diante dessa realidade, a prospecção de cenários futuros torna-se uma necessidade, a fim de possibilitar posturas estratégicas para que essa convergência tecnológica não seja apenas uma força de disrupção, mas também um catalisador de prosperidade sustentável, inclusiva e territorialmente orientada.

1.3 O papel dos agentes locais

Este documento existe para contribuir com essa preparação. Seu objetivo não é apenas informar sobre tendências tecnológicas, mas provocar letramento, reflexão estratégica e apropriação crítica por agentes locais.

Comunidades, pequenos municípios, escolas, organizações sociais, lideranças territoriais, pesquisadores, educadores e gestores públicos não precisam ser apenas receptores de tecnologias externas. Eles podem ser produtores de soluções, formuladores de perguntas, organizadores de dados, articuladores de projetos e protagonistas na definição de como essas tecnologias serão utilizadas em seus territórios.

A convergência entre energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas pode redefinir cadeias de valor, mercado de trabalho, pesquisa, economia, política, educação, defesa, indústria e gestão pública. Por isso, compreender seus riscos e oportunidades é uma condição estratégica para que os territórios não apenas sejam impactados pelo futuro, mas participem ativamente de sua construção.

2 Para quem este documento fala

Este documento fala para territórios, instituições e sujeitos que, historicamente, foram colocados à margem das grandes decisões tecnológicas, econômicas e científicas, mas que serão diretamente impactados pelas transformações em curso. Fala para comunidades negras urbanas, comunidades quilombolas, povos indígenas, comunidades ribeirinhas e tradicionais, pequenos municípios, juventudes, educadores, organizações sociais, pesquisadores, lideranças comunitárias e gestores locais.

Esses públicos não são homogêneos. Cada território possui histórias, necessidades, capacidades, riscos e formas próprias de organização. Por isso, esta é uma versão-base: o núcleo conceitual permanece comum, mas os exemplos, a linguagem, os problemas prioritários e as recomendações devem ser adaptados conforme cada realidade.

2.1 Comunidades negras urbanas

Para comunidades negras urbanas, este documento relaciona tecnologia a trabalho, renda, mobilidade, educação, segurança, cultura, empreendedorismo, acesso a serviços públicos e enfrentamento das desigualdades nas cidades. A convergência entre energia avançada, inteligência artificial e tecnologias digitais pode criar novas oportunidades, mas também pode ampliar exclusões se essas comunidades forem apenas consumidoras de soluções produzidas por outros.

2.2 Comunidades quilombolas

Para comunidades quilombolas, o debate tecnológico deve estar ligado ao território, à memória, à soberania alimentar, à energia comunitária, à educação contextualizada, à produção local e à defesa de direitos. Tecnologias habilitadoras podem fortalecer formas próprias de organização, monitoramento territorial, geração de renda e autonomia, desde que orientadas pelas prioridades da comunidade.

2.3 Povos indígenas

Para povos indígenas, este documento dialoga com temas como proteção territorial, línguas, cultura, monitoramento ambiental, autonomia política, dados comunitários e governança própria. A tecnologia não deve substituir os saberes tradicionais, mas pode ser articulada a eles para fortalecer a defesa dos territórios, a preservação das línguas, a gestão de informações e a produção de soluções definidas pelos próprios povos.

2.4 Comunidades ribeirinhas e tradicionais

Para comunidades ribeirinhas e tradicionais, as tecnologias habilitadoras se relacionam com clima, pesca, transporte, saúde, comunicação, energia distribuída, educação e adaptação ambiental. Em territórios marcados por distâncias, vulnerabilidades climáticas e dificuldades de acesso a serviços, a apropriação crítica dessas tecnologias pode ampliar a resiliência comunitária e melhorar a capacidade de resposta a problemas locais.

2.5 Pequenos municípios e gestores locais

Para pequenos municípios e gestores locais, este documento apresenta a tecnologia como instrumento estratégico para gestão pública, planejamento territorial, saúde, educação, dados, energia, defesa civil e desenvolvimento econômico local. A transformação tecnológica não será vivida apenas nas grandes capitais. Municípios menores também precisarão compreender essas mudanças para planejar políticas públicas, formar equipes e criar soluções adaptadas à sua realidade.

2.6 Juventudes, educadores e organizações sociais

Para juventudes, educadores e organizações sociais, este documento aponta caminhos para atuação como multiplicadores, mediadores e articuladores de processos de apropriação tecnológica local. Esses atores podem conectar conhecimento técnico, saberes territoriais e demandas sociais, ajudando comunidades e instituições a compreender riscos, identificar oportunidades e desenvolver projetos que fortaleçam a autonomia local.

Em todos esses casos, a mensagem central é a mesma: os territórios não devem apenas receber tecnologias prontas. Eles precisam compreendê-las, adaptá-las, questioná-las e orientá-las a partir de seus próprios problemas, prioridades e projetos de futuro.

3 O que são tecnologias habilitadoras e por que elas importam

Algumas tecnologias não transformam apenas um setor específico. Elas criam novas condições para que outros produtos, processos, serviços, formas de organização e campos do conhecimento se tornem possíveis. Por isso são chamadas de tecnologias habilitadoras: porque abrem caminhos, ampliam capacidades e aceleram mudanças em cadeia.

Ao longo da história, muitas transformações sociais, econômicas e culturais ocorreram quando uma ou mais tecnologias passaram a viabilizar novas formas de produzir, comunicar, transportar, aprender, governar e viver. O domínio do fogo, o advento da linguagem, o desenvolvimento da roda, a imprensa, a eletricidade, o computador e a internet são exemplos de tecnologias que não apenas resolveram problemas específicos, mas criaram novas possibilidades para a sociedade.

Essas tecnologias importam porque alteram a base sobre a qual outras mudanças acontecem. Elas podem gerar novas cadeias de valor, novos mercados, novas profissões, novos centros de poder e novas formas de desigualdade. Também podem ampliar oportunidades, fortalecer capacidades locais e abrir caminhos para modelos de desenvolvimento mais inclusivos, desde que sejam compreendidas, apropriadas e orientadas de forma crítica.

Neste documento, energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas são tratadas como tecnologias habilitadoras porque têm potencial para reorganizar a ciência, a economia, a gestão pública, o trabalho, a educação, a saúde, a produção e a vida nos territórios. Compreender sua importância é o primeiro passo para que comunidades, organizações e pequenos municípios não sejam apenas impactados por essas transformações, mas participem ativamente de sua construção.

3.1 Tecnologias que abrem caminhos

Tecnologias habilitadoras são inovações, recursos ou infraestruturas que viabilizam o desenvolvimento de novos produtos, processos, campos da ciência, serviços e formas de organização. Elas são consideradas fundamentais porque criam condições para que outras tecnologias e aplicações emergentes se tornem possíveis, acelerando a inovação, a competitividade e gerando impactos em cadeias inteiras de valor.

Diferentemente de tecnologias voltadas a uma aplicação muito específica, as tecnologias habilitadoras funcionam como plataformas de transformação. Elas ampliam a capacidade de ação de pessoas, instituições, empresas, governos e comunidades. Um computador, por exemplo, não serve apenas para executar uma tarefa isolada; ele permite simular fenômenos, organizar dados, criar sistemas, automatizar processos, produzir conhecimento, desenvolver pesquisas e conectar pessoas.

Por isso, o impacto dessas tecnologias costuma ser maior do que parece no início. Quando surgem, muitas vezes são vistas apenas como ferramentas novas. Com o tempo, revelam-se como bases para mudanças mais profundas na economia, na ciência, na política, no trabalho, na educação e na vida social.

Neste documento, energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas são compreendidas como tecnologias que abrem caminhos. Elas não importam apenas pelo que fazem isoladamente, mas pelo que tornam possível quando passam a sustentar novas capacidades produtivas, cognitivas, científicas, territoriais e institucionais.

3.2 Tecnologias habilitadoras na história

Desde o domínio do fogo, o advento da linguagem e o desenvolvimento da roda até as sucessivas revoluções industriais, a tecnologia tem sido um motor central das transformações sociais, econômicas e culturais da humanidade. Em diferentes momentos da história, algumas tecnologias não apenas resolveram problemas imediatos, mas criaram novas possibilidades para a organização da vida em sociedade.

No continente africano, o domínio da metalurgia do ferro também pode ser compreendido como uma tecnologia habilitadora. A produção de ferramentas de ferro ampliou a capacidade de cultivo, caça, pesca, construção, defesa, circulação e comércio em diferentes regiões, contribuindo para novas formas de organização social, econômica e política. Mais do que uma técnica de fabricação de instrumentos, o ferro tornou-se uma base material para transformações profundas, pois permitiu ampliar a produção de alimentos, estruturar redes de troca, fortalecer especializações produtivas e reorganizar relações entre territórios e comunidades.

Foi assim com a mecanização do século XVIII, que redefiniu a produção e inaugurou uma nova era de urbanização e organização do trabalho. A Segunda Revolução Industrial trouxe eletricidade, aço e comunicações em massa, ampliando a escala e a velocidade das mudanças. No século XX, a Terceira Revolução Industrial, marcada pela informática e pela automação, abriu caminho para a globalização, para a economia digital e para novas formas de produzir, comunicar e governar.

Grande parte dessas tecnologias eram habilitadoras. Isso resultou na aceleração da descoberta de outras tecnologias, métodos e processos. O surgimento da imprensa e o uso da água e do vento, por meio dos moinhos, como fontes de energia, por exemplo, foram indispensáveis um para o outro. Um habilitou o outro e, juntos, formaram uma plataforma tecnológica capaz de transformar o cenário econômico, social e político da Europa.

O computador também é um exemplo de tecnologia habilitadora. Ele acelerou vários campos da ciência, permitiu novas formas de cálculo, armazenamento e processamento de informações, ampliou a capacidade de pesquisa e criou as bases para a internet, a automação, a inteligência artificial e a economia digital.

A história mostra que tecnologias habilitadoras raramente produzem impactos isolados. Seus efeitos aparecem quando elas se conectam a outras tecnologias, instituições, formas de organização e necessidades sociais. Por isso, compreender uma tecnologia habilitadora exige olhar não apenas para sua função técnica, mas para os caminhos que ela abre e para as transformações que pode desencadear.

Como sintetiza a Figura 1, algumas tecnologias não apenas resolvem problemas específicos, mas abrem novas possibilidades de organização econômica, social, científica e política.

TECNOLOGIAS HABILITADORAS NA HISTÓRIA

Algumas inovações não apenas resolvem problemas específicos, mas abrem novas possibilidades de organização econômica, social, científica e política.

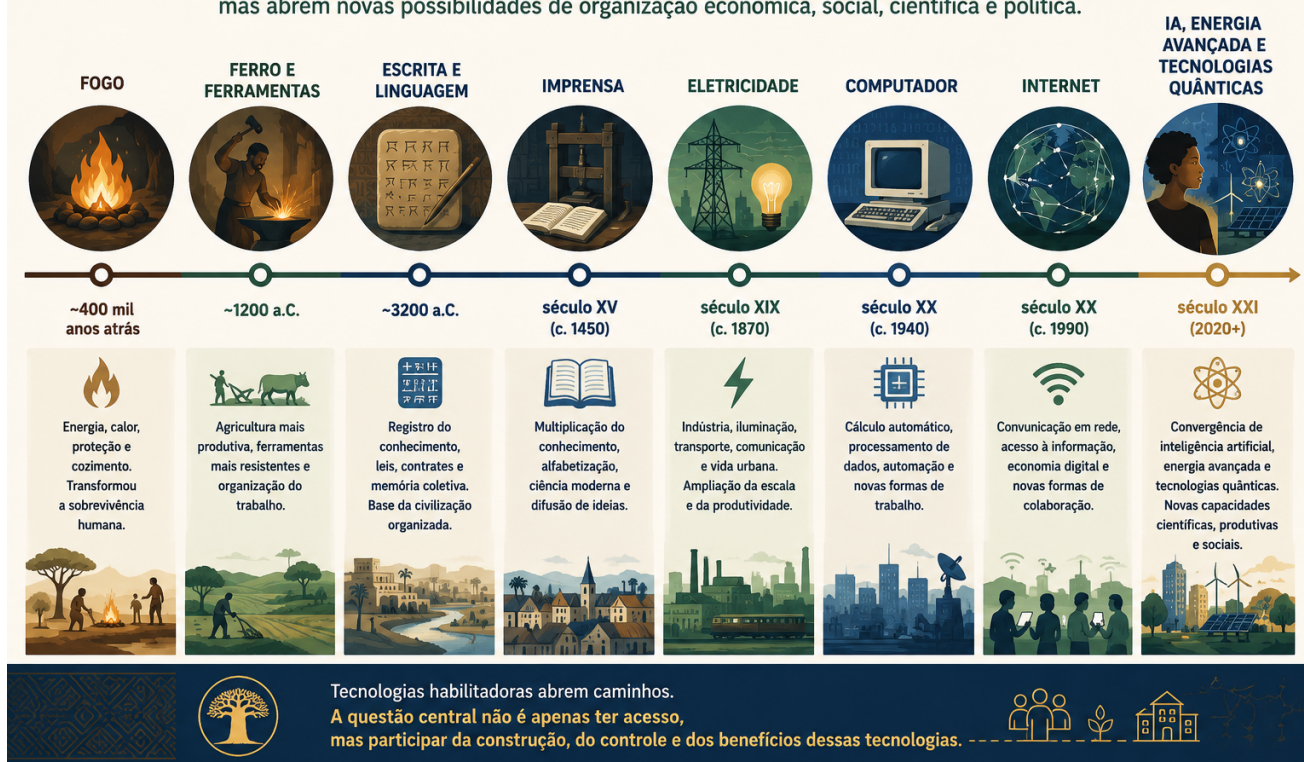


Figura 1: Tecnologias habilitadoras na história: algumas inovações não apenas resolvem problemas específicos, mas abrem novas possibilidades de organização econômica, social, científica e política.

3.3 Por que elas mudam economia, poder e sociedade

Tecnologias habilitadoras mudam economia, poder e sociedade porque não atuam apenas como ferramentas isoladas. Elas alteram as condições de produção, circulação, comunicação, decisão e organização da vida coletiva. Quando uma tecnologia passa a sustentar muitas outras atividades, ela deixa de ser apenas uma inovação técnica e se transforma em infraestrutura estratégica.

Na economia, essas tecnologias criam novas cadeias de valor, novos mercados, novos modelos de negócio e novas formas de competitividade. Também podem reduzir custos, aumentar produtividade, reorganizar setores inteiros e deslocar atividades antes consideradas centrais. Por isso, países, empresas, universidades e investidores disputam o domínio dessas tecnologias: quem controla a infraestrutura tecnológica tende a influenciar os rumos da produção, do trabalho e da inovação.

No campo do poder, tecnologias habilitadoras redefinem soberania, segurança e capacidade de decisão. Energia, dados, inteligência artificial, semicondutores, sensores, materiais avançados e tecnologias quânticas deixam de ser apenas temas técnicos e passam a compor a agenda estratégica de governos e grandes empresas. A inovação, nesse contexto, deixa de ser apenas motor econômico e torna-se também instrumento de poder estatal, geopolítico e institucional.

Na sociedade, os efeitos podem ser igualmente profundos. Tecnologias habilitadoras podem ampliar acesso a conhecimento, serviços, saúde, educação, energia e oportunidades. Mas também podem produzir novas desigualdades quando seu desenvolvimento e sua governança ficam concentrados em poucos atores. A inteligência artificial, por exemplo, já revela uma distribuição desigual de capacidade tecnológica: em 2024, instituições sediadas nos Estados Unidos produziram 40 modelos notáveis de IA, enquanto a China produziu 15 e a Europa apenas 3 [35]. No mesmo período, o investimento privado em IA nos Estados Unidos alcançou US\$ 109,1 bilhões, valor muito superior ao registrado em outros países [35].

Essa concentração mostra que o acesso à tecnologia não garante, por si só, autonomia. É possível usar sistemas avançados sem compreender, controlar ou orientar seu funcionamento. Por isso, a questão central não é apenas consumir tecnologias, mas desenvolver capacidades para adaptá-las, regulá-las, produzir dados próprios, formar pessoas e decidir como elas serão utilizadas em cada contexto.

Para comunidades, organizações sociais e pequenos municípios, compreender tecnologias habilitadoras é uma condição estratégica. Elas podem abrir caminhos para novas oportunidades de desenvolvimento local, mas também podem ampliar dependências se forem impostas de fora para dentro. O desafio, portanto, é transformar essas tecnologias em instrumentos de autonomia, inclusão, sustentabilidade e fortalecimento territorial.

3.4 O que torna o momento atual diferente

As tecnologias habilitadoras que estão moldando o século XXI inauguram um ciclo de transformação com características próprias. O que diferencia o momento atual das revoluções anteriores não é apenas a natureza das inovações, mas a velocidade, a densidade e a convergência com que elas emergem.

A Figura 2 sintetiza os três elementos que tornam o ciclo tecnológico atual diferente das transformações anteriores: velocidade, densidade e convergência.

VELOCIDADE, DENSIDADE E CONVERGÊNCIA A SINGULARIDADE DO CICLO TECNOLÓGICO ATUAL



Figura 2: Velocidade, densidade e convergência: três características que ajudam a compreender a singularidade do ciclo tecnológico atual.

Velocidade. O espaço temporal entre o surgimento de tecnologias habilitadoras e sua difusão vem diminuindo de forma significativa. Historicamente, muitas transformações tecnológicas eram separadas por décadas ou séculos. Hoje, esse intervalo parece cada vez menor. Reatores Modulares Pequenos (SMRs) avançam da prototipagem para a implantação; a fusão nuclear encurta ciclos de pesquisa que antes pareciam muito distantes; tecnologias quânticas evoluem simultaneamente em computação, sensores, comunicação e navegação; e a inteligência artificial generativa alcançou ampla visibilidade pública em poucos anos. O que antes era sequencial agora ocorre de forma cada vez mais paralela.

Densidade. A quantidade de tecnologias habilitadoras em desenvolvimento também é muito maior. As revoluções anteriores foram impulsionadas por uma ou duas tecnologias centrais. O ciclo atual é movido por um portfólio amplo de tecnologias de propósito geral: na energia, hidrogênio, armazenamento, Reatores Modulares Pequenos (SMRs) e fusão nuclear; na inteligência, IA generativa, IA científica, automação cognitiva e agentes autônomos; nas tecnologias quânticas, computação, comunicação, sensores, navegação e simulação. Essa densidade cria um ambiente em que múltiplas frentes tecnológicas avançam ao mesmo tempo, ampliando impactos e complexidades.

Convergência. O diferencial mais estratégico do ciclo atual está no fato de que essas tecnologias não evoluem isoladamente. Elas se aceleram mutuamente. A inteligência artificial pode apoiar pesquisas em fusão nuclear, otimizar projetos de SMRs, acelerar descobertas científicas e contribuir para avanços em computação quântica. As tecnologias quânticas podem ampliar capacidades de simulação, segurança, materiais, sensores e ciência. A nova matriz energética, por sua vez, torna-se condição essencial para sustentar a demanda crescente de infraestrutura computacional, inteligência artificial e sistemas quânticos.

Essa combinação cria um sistema de retroalimentação positiva, no qual cada avanço pode destravar novas possibilidades em outros campos. Por isso, o momento atual não deve ser compreendido apenas como mais uma etapa de inovação tecnológica, mas como uma possível reorganização das bases materiais, cognitivas, científicas e institucionais da sociedade. Para os territórios, isso significa que os impactos não virão de uma única tecnologia isolada, mas da forma como energia, inteligência artificial e tecnologias quânticas serão combinadas, governadas e apropriadas.

4 As grandes famílias tecnológicas que estão mudando o mundo

Entre as tecnologias habilitadoras que podem marcar as próximas décadas, três grandes famílias se destacam: energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas. Cada uma delas reúne diferentes inovações, aplicações e infraestruturas, mas seu impacto mais profundo está no fato de que podem reorganizar a ciência, a economia, o trabalho, a gestão pública, a segurança, a educação e a vida nos territórios.

A Figura 3 apresenta as três famílias tecnológicas centrais discutidas neste documento: energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas.



Figura 3: As três famílias tecnológicas centrais: energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas como tecnologias habilitadoras para novas capacidades científicas, produtivas, institucionais e territoriais.

4.1 Energia avançada

A energia é necessária em quase todas as atividades que realizamos e em praticamente tudo que utilizamos. Toda vez que a principal fonte de energia mudou no mundo, ocorreram transformações expressivas na economia, na política e na sociedade, além de mudanças profundas nos transportes, nas comunicações e nas formas de organização da vida coletiva. Por isso, a primeira e a segunda revoluções industriais são consideradas entre as mais profundas da história, com grandes impactos para a sociedade, para as organizações e para os países.

A principal diferença da era que estamos vivendo é que não se trata apenas da substituição de uma fonte de energia por outra. Trata-se de várias formas de capturar, gerar, armazenar, transportar e distribuir energia avançando quase simultaneamente. Esse movimento modifica não apenas a matriz energética, mas também os modelos de geração e distribuição, com impactos sociais, econômicos e políticos que podem caracterizar uma nova revolução industrial.

As tecnologias de armazenamento de energia, principalmente as baterias, têm evoluído de forma surpreendente. O mesmo acontece com as fontes de captação e geração de energia. O custo da energia solar caiu cerca de 90% na última década, tornando-se uma das fontes mais baratas de eletricidade. Mas nem sempre foi assim. Na década de 1970, a eletricidade produzida a partir da energia solar custava quase 100 vezes mais do que a energia da rede [6]. As turbinas eólicas também eram menos confiáveis e produziam apenas uma pequena fração da energia quando comparadas às turbinas atuais. Além disso, várias descobertas e inovações vêm ocorrendo na geração de energia, como hidrogênio, reatores modulares pequenos e fusão nuclear.

Essas transformações tornam a energia avançada uma das principais tecnologias habilitadoras do século XXI. Para os territórios, esse debate não é distante: ele se relaciona com autonomia, redução de custos, segurança energética, resiliência climática, produção local, conectividade, transporte, abastecimento de água, saúde, educação e desenvolvimento econômico. Compreender a nova matriz energética é, portanto, uma condição estratégica para que comunidades, organizações e pequenos municípios participem da transição energética de forma justa e ativa.

4.1.1 Hidrogênio

Estima-se que cerca de 90% dos átomos presentes no Universo sejam de hidrogênio. Ele é o elemento químico mais abundante do cosmos. As estrelas, como o nosso Sol, são formadas principalmente por esse gás, que também pode assumir o estado líquido.

O hidrogênio possui alto nível de energia: no processo de combustão, libera aproximadamente três vezes mais energia do que uma molécula de gasolina ou gás; e, na fusão nuclear, pode liberar cerca de 6,7 MeV [6].

Embora existam, há muitos anos, tecnologias que permitem usar o hidrogênio como combustível, há várias razões pelas quais, até agora, ele foi utilizado apenas em situações específicas, como para impulsionar espaçonaves da NASA, a agência espacial americana. Um dos principais obstáculos estava relacionado à dificuldade de encontrá-lo isolado. Durante muito tempo, considerou-se que, na Terra, o hidrogênio existia principalmente em combinação com outros elementos. Ele está presente na água, ligado ao oxigênio, e combina-se com o carbono para formar hidrocarbonetos, como gás e petróleo. Para ser usado como combustível, precisava ser separado de outras moléculas. Esse processo demandava grande quantidade de energia e era muito caro.

Além disso, por ser um gás muito leve e inflamável, o transporte e o armazenamento do hidrogênio representavam importantes ofensores de custo. No entanto, as descobertas recentes, as inovações tecnológicas, o volume de investimentos e os interesses privados e estatais têm contribuído para tornar o hidrogênio mais competitivo e uma das possíveis fontes de geração de energia a serem exploradas.

Avanços na tecnologia de eletrólise levaram a uma diminuição significativa no custo de produção do hidrogênio verde, tornando-o mais competitivo em relação às fontes tradicionais de energia. A MACH2, um dos sete centros de hidrogênio dos Estados Unidos que receberam até US\$ 1 bilhão em financiamento governamental, procura desenvolvedores capazes de entregar hidrogênio a US\$ 1/kg até 2032. Esse valor é relevante porque o hidrogênio passa a ser competitivo quando fica abaixo de US\$ 2/kg [7].

Durante a maior parte da era moderna da energia, o hidrogênio foi tratado como um combustível fabricado, e não como um recurso encontrado por processo de mineração. Recentemente, um estudo liderado por um geoquímico de petróleo do Serviço Geológico dos Estados Unidos estimou que a Terra poderia armazenar cerca de 6,2 trilhões de toneladas de hidrogênio em rochas e reservatórios subterrâneos. O Serviço Geológico dos Estados Unidos também divulgou o primeiro mapa de recursos geológicos potenciais de hidrogênio nos Estados Unidos continentais. Esse mapa identifica áreas promissoras onde o gás hidrogênio natural pode ser encontrado em quantidades suficientes para extração, espalhadas por cerca de 30 estados americanos. Outros estudos também estão sendo realizados em diferentes países [8].

Paralelamente, o problema do transporte e da armazenagem também tem apresentado progressos importantes. O transporte de hidrogênio sempre foi considerado um desafio, pois, apesar de ser um dos combustíveis mais limpos disponíveis, é também um dos mais difíceis de manusear. Tradicionalmente, havia a necessidade de comprimi-lo em cilindros a centenas de bars de pressão ou transportá-lo em estado liquefeito a -253°C, o que exigia uma infraestrutura criogênica cara. Ambos os processos são arriscados, dispendiosos e exigem muita infraestrutura. Esse era um dos principais motivos pelos quais a implementação

do hidrogênio vinha sendo lenta.

Essa realidade pode mudar com a tecnologia de Transportadores Orgânicos Líquidos de Hidrogênio, conhecida pela sigla LOHC. Essa tecnologia permite o transporte e o armazenamento seguros de hidrogênio a longas distâncias, utilizando parte da infraestrutura de petróleo existente, por meio da ligação química do hidrogênio a transportadores líquidos, como o dibenzil tolueno, em um processo semelhante ao transporte e armazenamento da gasolina. Ela opera por meio de hidrogenação, no carregamento, e desidrogenação, na liberação, em condições ambientais, apresentando eficiência de 80% a 90% com recuperação de calor [9].

Isso significa que o hidrogênio pode passar a ser transportado usando caminhões-tanque de gasolina ou diesel existentes, contêineres de armazenamento padrão e, potencialmente, até mesmo dutos, reduzindo drasticamente custos e riscos. Entre os principais atores desse desenvolvimento estão empresas como Hydrogenious, Ayrton Energy e Honeywell, com mercado previsto para atingir US\$ 5,5 bilhões até 2035 [9].

Além dessas iniciativas, algumas indústrias, como Toyota, Mazda e Subaru, concluíram conjuntamente o desenvolvimento de motores a combustão movidos a hidrogênio, ao mesmo tempo em que continuam apostando nas células de combustível a hidrogênio. Essas empresas consideram que mercados como transporte pesado, embarcações, aeronaves, fontes estacionárias de geração de energia e até veículos urbanos poderão utilizar esse tipo de propulsão [10].

De acordo com análise da Market Research Future, o tamanho do mercado de polos de hidrogênio foi estimado em US\$ 2,49 bilhões em 2024. A projeção é de que o setor cresça de US\$ 2,963 bilhões em 2025 para US\$ 16,88 bilhões em 2035, apresentando uma taxa de crescimento anual composta de 19% durante o período de previsão de 2025 a 2035 [11].

Esses movimentos indicam que o hidrogênio pode assumir papel importante na nova matriz energética, especialmente quando combinado com outras tecnologias de geração, armazenamento, transporte e uso final da energia. Para os territórios, o debate sobre hidrogênio se conecta à transição energética justa, à criação de novas cadeias produtivas, à formação de mão de obra, à segurança energética e à possibilidade de participação local em mercados emergentes de energia limpa.

4.1.2 Reatores Modulares Pequenos — SMRs

Os reatores nucleares tradicionais, geralmente de grande porte, dependem de obras civis complexas, altos investimentos iniciais e longos prazos entre a encomenda e a entrada em funcionamento, além de exigirem infraestrutura robusta para operação e resfriamento. Já os Reatores Modulares Pequenos, conhecidos pela sigla SMR, destacam-se por serem menores, fabricados em módulos padronizados, escaláveis e transportáveis, o que pode reduzir custos, acelerar a instalação e facilitar a manutenção.

Além disso, os SMRs oferecem maior flexibilidade para atender diferentes demandas energéticas, incorporam sistemas de segurança passiva mais avançados e podem ser instalados em locais onde grandes reatores seriam inviáveis. Com isso, tornam a energia nuclear mais acessível e adaptável às necessidades atuais.

A NuScale Power, nos Estados Unidos, tornou-se um dos nomes mais emblemáticos desse movimento. Fundada nos anos 2000, a empresa foi pioneira ao desenvolver um projeto de reator modular leve, com forte ênfase em segurança passiva e fabricação padronizada, ajudando a transformar os SMRs de uma ideia promissora em uma tecnologia nuclear emergente com viabilidade comercial. Desde então, esse movimento ganhou força com grande quantidade de investimentos governamentais e privados, além da entrada de outros atores no setor.

Entre as principais empresas e startups de SMR pelo mundo estão: nos Estados Unidos, NuScale Power, TerraPower, X-energy, Westinghouse eVinci, Holtec International, Last Energy e Oklo Inc.; no Reino Unido, Rolls-Royce SMR e MoltexFLEX/Moltex Energy; no Canadá, ARC Clean Technology, Terrestrial Energy e Ultra Safe Nuclear Corporation; na França, EDF/NUWARD; na Rússia, Rosatom/RITM Series; na China, CNNC/ACP100 e CGN/Linglong One; no Japão, Mitsubishi Heavy Industries/iSMR; na Coreia do Sul, KHNP/SMART Reactor; na Austrália, SMR Nuclear Technology; na Suécia, LeadCold/SEALER; e, na Finlândia, Steady Energy.

O sistema de energia integrado da NuScale foi projetado para fornecer também soluções para dessalinização de água e produção de hidrogênio limpo, aproveitando o calor que precisa ser dissipado pelo SMR. O sistema propõe acoplar um Módulo de Energia NuScale a uma instalação de dessalinização por osmose reversa. De acordo com projeções da empresa, um único módulo poderia fornecer água dessalinizada para uma cidade de 2,3 milhões de habitantes e ainda ter energia excedente para fornecer eletricidade a 400.000 residências [12].

A Radiant desenvolveu um microrreator denominado Kaleidos, de 1 megawatt, projetado para modularidade, implantação rápida e substituição de geradores a diesel. Seus casos de uso miram ambientes como assentamentos remotos, bases operacionais avançadas militares e zonas de desastre, onde a infraestrutura de rede elétrica está ausente ou comprometida. A empresa pretende implantar seus primeiros reatores operacionais para clientes até 2028. Sua missão é produzir microrreatores econômicos, seguros e logisticamente flexíveis. O sistema foi projetado para transporte aéreo, rodoviário ou marítimo e inclui uma unidade integrada de conversão de energia e blindagem modular. A empresa projeta produção de até 50 unidades por ano quando suas instalações estiverem operacionais. Analistas do setor consideram o Kaleidos uma tecnologia-chave no campo emergente da energia nuclear tática e fora da rede [13].

O Exército dos Estados Unidos lançou o Programa Janus, em 14 de outubro de 2025, para instalar um pequeno reator

modular em uma base militar até 2028, em mais uma iniciativa do Departamento de Defesa para promover a tecnologia. O programa visa fornecer energia fora da rede para instalações militares, redes de comunicação, sistemas de armas e centros de comando. Embora muitas empresas selecionadas para programas do Departamento de Energia dos Estados Unidos busquem construir reatores entre 20 MW e 75 MW, o Departamento de Defesa está concentrado em microrreatores, com capacidade entre 1 MW e 20 MW, projetados para serem totalmente transportáveis [14].

Oklo e TerraPower, duas empresas que desenvolvem pequenos reatores modulares, assinaram acordos com a Meta para construir múltiplos reatores. Os acordos resultaram de uma solicitação de propostas emitida pela Meta em dezembro de 2024, na qual a empresa buscava parceiros capazes de adicionar entre 1 GW e 4 GW de capacidade de geração até o início da década de 2030. Grande parte dessa nova energia deverá fluir pela interconexão PJM, uma rede que abrange 13 estados do Meio-Atlântico e do Centro-Oeste dos Estados Unidos e que já está saturada de data centers [15].

A NuScale Power assinou um memorando de entendimento com a Tennessee Valley Authority para implantar até 6 GW de capacidade de reatores modulares pequenos em sete estados dos Estados Unidos. O acordo representa o maior programa de implantação de SMR planejado na história do país. Em um horizonte de três e cinco anos, as ações da empresa apresentaram ganhos de 63,8% e 55,3%, respectivamente, o que mostra como a percepção do mercado em relação à NuScale mudou ao longo do tempo, à medida que a empresa avança em sua fase de desenvolvimento [16].

A TerraPower, empresa de energia nuclear apoiada por Bill Gates e pela NVIDIA, passou pela avaliação final de segurança da equipe da Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos para obter licença de construção de um reator no Wyoming. A empresa, sediada em Washington, estabeleceu a meta de produzir energia no local de Kemmerer, Wyoming, até 2030. Em junho de 2025, anunciou um novo aporte de US\$ 650 milhões de Bill Gates e do braço de investimentos da NVIDIA. Anteriormente, a empresa já havia captado mais de US\$ 1 bilhão, incluindo investimentos de Gates, da SK Inc. e da SK Innovation, ambas sediadas na Coreia do Sul. A TerraPower também recebeu cerca de US\$ 2 bilhões do Departamento de Energia dos Estados Unidos [17].

Esses movimentos indicam que os SMRs e microrreatores podem ocupar papel estratégico na nova matriz energética, especialmente em contextos que demandam energia estável, modular, de baixa emissão e instalada próxima ao local de consumo. Para territórios, pequenos municípios, comunidades remotas, sistemas produtivos locais e infraestruturas críticas, essa discussão é relevante porque aponta para novos modelos de segurança energética, dessalinização, produção de hidrogênio, substituição de geradores a diesel e fornecimento de energia para regiões fora da rede ou vulneráveis a interrupções.

4.1.3 Fusão nuclear

A fusão nuclear, por muito tempo tratada como uma utopia científica, entrou em uma nova fase graças a avanços tecnológicos que mudaram a percepção sobre sua viabilidade. Inovações como ímãs supercondutores de alta temperatura, melhorias no confinamento de plasma e progressos em abordagens alternativas, como fusão por laser e fusão por campo magnético compacto, reduziram barreiras que antes pareciam intransponíveis. Esse salto tecnológico coincidiu com um aumento expressivo de investimentos: governos como os dos Estados Unidos, China, Reino Unido, Japão e União Europeia ampliaram programas estratégicos, enquanto empresas privadas atraíram bilhões de dólares para desenvolver reatores demonstradores capazes de gerar mais energia do que consomem.

O alinhamento entre ciência, capital e geopolítica transformou a expectativa global sobre a fusão. O que antes era visto como um horizonte distante passou a ser tratado como uma corrida tecnológica, com prazos mais ousados e metas concretas. Os Estados enxergam na fusão uma oportunidade de liderança energética e industrial. Embora ainda não exista um reator comercial operando, a corrida internacional se intensificou, com novas estatais dedicadas ao tema, como a recém-criada Empresa Nacional Chinesa de Energia de Fusão, e com projeções que estimam um potencial de até US\$ 400 bilhões em receitas até 2040. Paralelamente, empresas privadas vêm impulsionando o setor com aportes bilionários: startups como a Commonwealth Fusion Systems já captaram mais de US\$ 3 bilhões, com apoio de gigantes como Google, NVIDIA e fundos ligados a Bill Gates, mirando reatores demonstradores e comerciais capazes de abastecer desde redes elétricas até data centers de inteligência artificial.

Embora desafios técnicos persistam, o volume de recursos, o interesse estratégico e a velocidade das descobertas criaram um consenso crescente: a fusão nuclear deixou de ser apenas uma promessa futurista e se tornou um projeto real, competitivo e cada vez mais próximo de integrar a matriz energética mundial.

Um momento científico decisivo para a energia de fusão ocorreu no final de 2022, quando cientistas do Laboratório Nacional Lawrence Livermore conseguiram realizar a chamada “primeira ignição”, fundindo átomos por meio de calor extremo para gerar mais energia do que o equipamento consumiu pela primeira vez na história. A promessa potencial da fusão é fornecer energia limpa e consistente, sem os mesmos problemas de intermitência de outras fontes renováveis e com menor dependência de cadeias estrangeiras de suprimentos. A partir desse marco, cresceu o número de empresas que buscam a comercialização da fusão dentro de uma década, ainda que as estimativas de prazo permaneçam incertas e, muitas vezes, excessivamente otimistas [18].

Existem, entretanto, obstáculos importantes que ainda impedem o desenvolvimento da fusão em escala comercial. Até mesmo a menor partícula de ar pode interromper uma reação de fusão. A Commonwealth Fusion Systems, em Massachusetts, afirma estar criando um recipiente capaz de manter uma reação de fusão completamente hermética. A empresa chamou esse

equipamento de “recipiente a vácuo”, descrevendo o contêiner de aço de 48 toneladas como uma peça fundamental enquanto trabalha para alcançar energia de fusão comercial em larga escala [19].

Uma empresa japonesa também concluiu testes de um ímã supercondutor que pode ajudar a viabilizar a energia de fusão em escala comercial. A Helical Fusion testou uma bobina que manteve o fluxo de eletricidade constante enquanto exposta às intensas forças magnéticas presentes em um reator de fusão em funcionamento. O teste da bobina da startup supera uma barreira importante: construir ímãs poderosos o suficiente para reter o gás ionizado extremamente quente necessário às reações de fusão. A empresa planeja construir equipamentos de demonstração até o final da década e, durante a década de 2030, pretende lançar sua primeira instalação piloto operando continuamente, gerando mais energia do que consome e permitindo a manutenção realista dos componentes [20].

O Departamento de Energia dos Estados Unidos divulgou um roteiro detalhado para comercializar a energia de fusão nuclear, tecnologia que poderá transformar os sistemas energéticos mundiais na próxima década. O documento, publicado em 16 de outubro de 2025, identifica barreiras que ainda impedem que a fusão se torne prática e escalável. O projeto também estabelece marcos para testes e desenvolvimento no setor privado, com o objetivo de alcançar a implantação em larga escala da energia de fusão na década de 2030. Empresas como a Commonwealth Fusion Systems, que está construindo uma máquina de demonstração em Massachusetts, já se movimentam para produzir o primeiro plasma em 2026 e energia líquida de fusão logo depois. O Departamento de Energia prevê que as primeiras usinas comerciais possam começar a operar dentro de cinco a dez anos, juntamente com novas instalações governamentais voltadas ao ciclo de combustível de trítio e outros sistemas essenciais [21].

A Focused Energy, empresa germano-americana, anunciou planos para construir uma instalação de US\$ 65 milhões. Na instalação, a empresa começará a trabalhar na construção de lasers capazes de gerar temperaturas comparáveis às do Sol para criar energia. Segundo a empresa, uma vez totalmente operacional, sua instalação seria capaz de abastecer uma cidade como São Francisco com uma quantidade muito pequena de combustível de fusão por dia [22].

Outro empreendimento relevante é liderado pela Proxima Fusion, startup sediada em Munique, dedicada a aproveitar o potencial da fusão nuclear. A empresa garantiu US\$ 150 milhões em uma rodada de financiamento, elevando o total captado para mais de US\$ 213 milhões, e está avançando na construção de uma usina de energia de fusão comercial baseada no design stellarator. Parte significativa do novo financiamento será dedicada a marcos específicos de engenharia e desenvolvimento, incluindo a conclusão da Bobina Modelo do Stellarator até 2027. Em paralelo, a Proxima Fusion está finalizando a localização de seu stellarator de demonstração, chamado Alpha, com previsão de início de operação em 2031 [23].

Nos Estados Unidos, várias empresas privadas também manifestaram interesse em construir usinas de fusão comerciais. A Helion pretende concluir uma usina de fusão para abastecer edifícios da Microsoft já em 2028, enquanto a Type One Energy fez parceria com a Tennessee Valley Authority e o Oak Ridge National Laboratory para seu projeto. O Departamento de Energia dos Estados Unidos também declarou que pretende levar a energia de fusão às redes comerciais até meados da década de 2030.

O Google assinou um acordo de investimento e fornecimento de energia com a Commonwealth Fusion Systems para 200 MW de energia proveniente de sua primeira usina de fusão comercial ARC, que será construída na Virgínia. A Commonwealth Fusion Systems foi fundada em 2018 como uma spin-off do Instituto de Tecnologia de Massachusetts. A empresa utiliza ímãs supercondutores de alta temperatura desenvolvidos em colaboração com o MIT para construir tokamaks menores e de menor custo do que os normalmente usados em pesquisas científicas de fusão. Atualmente, está construindo o protótipo da máquina de fusão SPARC em sua sede em Devens, Massachusetts. A usina ARC de 400 MW, que a empresa pretende construir no Condado de Chesterfield, Virgínia, tem como objetivo ser a primeira usina de energia de fusão em escala de rede do mundo, com meta de fornecer energia à rede no início da década de 2030 [24].

O Departamento de Energia dos Estados Unidos e a Rutherford Energy Ventures anunciaram uma parceria público-privada com o objetivo de acelerar o desenvolvimento de materiais e infraestrutura especializados necessários para a energia de fusão comercial. A colaboração implantará e gerenciará uma estrutura conhecida como FULCRA, voltada à criação de instalações integradas de teste de componentes para validar projetos comerciais, qualificar cadeias de suprimentos e demonstrar confiabilidade em escala industrial. A iniciativa busca enfrentar uma lacuna tecnológica específica no ecossistema de fusão dos Estados Unidos: a falta de materiais de fusão e tecnologias nucleares suficientemente desenvolvidas [25].

O FULCRA identificou quatro áreas tecnológicas principais que exigem desenvolvimento imediato. A primeira é o desenvolvimento de materiais resistentes à radiação, capazes de suportar intenso bombardeio de nêutrons e altas temperaturas dentro de um reator de fusão por décadas. A segunda envolve métodos confiáveis para o manuseio do combustível de trítio e para a geração de novo trítio dentro do manto do reator. A terceira concentra-se no projeto e teste de sistemas de manto integrados, responsáveis por capturar a energia de fusão como calor e gerar novo trítio. Por fim, a iniciativa pretende criar instalações de teste de componentes integrados, necessárias para validar projetos comerciais, qualificar cadeias de suprimentos e demonstrar a confiabilidade dos componentes em escala industrial [25].

A Maritime Fusion, empresa de energia de fusão que desenvolve reatores pioneiros para aplicações marítimas e fora da rede elétrica, anunciou o fechamento de uma rodada de investimento seed de US\$ 4,5 milhões liderada pela Trucks VC, com participação de Paul Graham, Alumni Ventures, Aera VC, Y Combinator e investidores anjo estratégicos. Enquanto a maioria das empresas de fusão mira diretamente a produção de eletricidade para a rede, a Maritime Fusion adota uma abordagem

diferente: desenvolve um reator tokamak de baixa densidade de potência, otimizado para aplicações fora da rede elétrica e no transporte marítimo. Essa estratégia busca atender primeiros casos de uso comercial com menor demanda energética, zero emissões e paridade de custos com fontes alternativas, além de reduzir desafios ainda não resolvidos de ciência dos materiais e confinamento que surgem entre a fusão de equilíbrio e os reatores em escala de rede [26].

Esses movimentos indicam que a fusão nuclear pode se tornar uma das tecnologias mais estratégicas da nova matriz energética. Ainda que sua adoção comercial dependa de desafios científicos, materiais, regulatórios, industriais e financeiros, a intensidade dos investimentos e a diversidade de abordagens tecnológicas mostram que a fusão deixou de ser apenas um horizonte distante. Para os territórios, acompanhar essa agenda é importante porque seus efeitos futuros poderão influenciar custos de energia, segurança energética, infraestrutura produtiva, cadeias industriais, formação de talentos e novas oportunidades associadas à transição energética.

4.2 Inteligência artificial

A inteligência artificial consolida-se como uma tecnologia habilitadora sistêmica porque não se limita a um setor específico: atua como uma camada transversal capaz de ampliar capacidades humanas, científicas, produtivas e institucionais. Diferentemente de infraestruturas físicas tradicionais, a IA pode ser adaptada, replicada e escalada em múltiplos contextos, apoiando decisões complexas, organização de dados, uso de recursos escassos e acesso ao conhecimento. Seu caráter habilitador, entretanto, não é automático: depende de escolhas políticas, modelos de governança, formação de pessoas, acesso a dados e estratégias de inclusão capazes de evitar concentração de poder, dependência tecnológica e reprodução de desigualdades históricas [35, 36, 37].

4.2.1 Inteligência artificial como tecnologia habilitadora sistêmica

A inteligência artificial consolida-se como uma tecnologia habilitadora sistêmica porque não se limita a um setor específico, mas atua como uma camada transversal capaz de ampliar capacidades humanas, científicas, produtivas e institucionais em contextos altamente diversos. A velocidade dessa difusão já pode ser observada no uso organizacional da tecnologia. Em 2024, 78% das organizações consultadas pelo AI Index relataram utilizar IA, ante 55% em 2023, enquanto o uso de IA generativa em pelo menos uma função de negócio passou de 33% para 71% no mesmo intervalo [35]. Esses números indicam que a IA deixou de ser uma tecnologia de nicho e passou a ocupar posição central na organização do trabalho, da pesquisa e dos serviços.

Diferentemente de infraestruturas físicas tradicionais, a IA pode ser adaptada, replicada e escalada em múltiplos contextos, o que a torna especialmente relevante para países em desenvolvimento e para o Sul Global. Nesse contexto, a IA não deve ser compreendida apenas como ferramenta de automação, mas como infraestrutura cognitiva capaz de apoiar decisões complexas, otimizar o uso de recursos escassos e ampliar o acesso ao conhecimento. O Banco Mundial destaca que muitos países de baixa e média renda já começam a adotar soluções de Small AI, mais acessíveis e aptas a operar em dispositivos cotidianos, com aplicações concretas em agricultura, saúde e educação [36, 37].

Em países marcados por limitações históricas de investimento, assimetrias regionais e fragilidades institucionais, a IA apresenta potencial transformador justamente por sua capacidade de atuar onde há escassez de especialistas, dados fragmentados e baixa capacidade operacional. Isso se torna ainda mais relevante quando se observa que a Organização Mundial da Saúde estima um déficit projetado de 11,1 milhões de trabalhadores da saúde até 2030, concentrado principalmente em países de baixa e média renda [38]. Em cenários como esse, sistemas baseados em IA podem apoiar triagem, diagnóstico, organização de fluxos e priorização de casos, fortalecendo capacidades locais em vez de simplesmente substituí-las.

No mundo do trabalho, os dados mais recentes da Organização Internacional do Trabalho apontam na mesma direção. Um em cada quatro trabalhadores está em ocupações com algum grau de exposição à IA generativa, mas apenas 3,3% do emprego global encontra-se hoje na faixa mais alta de exposição [39]. Isso indica que os efeitos da IA sobre o trabalho não serão homogêneos e dependerão das condições de cada país, setor, território e grupo social.

Para populações negras, indígenas e comunidades tradicionais, a IA pode desempenhar papel estratégico ao viabilizar soluções contextualizadas, desde que desenvolvida com participação local e governança adequada. Isso é particularmente importante em contextos educacionais e linguísticos. A UNESCO informa que 40% da população mundial não tem acesso à educação em uma língua que fale e compreenda fluentemente. Em alguns países de baixa e média renda, esse percentual chega a 90%, afetando mais de um quarto de bilhão de estudantes [40]. Em situações como essa, sistemas de IA voltados à tradução, produção de conteúdo multilíngue, mediação pedagógica e preservação de línguas e saberes podem ampliar inclusão, autonomia e visibilidade social.

Entretanto, o caráter habilitador da IA no Sul Global não é automático. Ele depende de escolhas políticas, modelos de governança e estratégias de inclusão capazes de evitar a concentração de poder, a dependência tecnológica e a reprodução de desigualdades históricas. O FMI estima que quase 40% dos empregos no mundo serão afetados pela IA. Essa exposição é desigual, alcançando cerca de 60% nas economias avançadas, 40% nos mercados emergentes e 26% nos países de baixa renda [41]. Isso significa que muitos países menos desenvolvidos podem sofrer menos disrupção imediata, mas também correm maior risco de ficar para trás na captura dos ganhos de produtividade, renda e capacidade institucional associados à nova

tecnologia.

Quando tratada como infraestrutura pública estratégica, com investimento em capacitação, acesso a dados, modelos abertos e uso responsável, a inteligência artificial pode se tornar um vetor de desenvolvimento mais equitativo, capaz de transformar limitações estruturais em oportunidades e contribuir para trajetórias de prosperidade sustentável e socialmente inclusiva.

4.2.2 Estrutura atual da inteligência artificial: centralização de capacidade cognitiva global

A inteligência artificial consolidou-se inicialmente a partir de uma configuração altamente concentrada. O desenvolvimento dos modelos fundacionais exigiu volumes massivos de dados, grande disponibilidade energética e capacidade computacional em escala industrial. Essa concentração pode ser observada em diferentes indicadores. Em 2024, instituições sediadas nos Estados Unidos produziram 40 modelos notáveis de IA, enquanto a China produziu 15 e a Europa apenas 3 [35]. No mesmo ano, o investimento privado em IA nos Estados Unidos alcançou US\$ 109,1 bilhões, valor cerca de 12 vezes superior ao da China, com US\$ 9,3 bilhões, e 24 vezes superior ao do Reino Unido, com US\$ 4,5 bilhões [35]. Esses requisitos e assimetrias restringiram a criação dos sistemas mais avançados a poucos centros tecnológicos, localizados principalmente em países do Norte Global e operados por grandes empresas de tecnologia.

Essa concentração não representa apenas um estágio técnico da tecnologia, mas uma forma específica de organização da capacidade cognitiva automatizada. Grandes plataformas passaram a oferecer inteligência como serviço, permitindo que organizações utilizem recursos avançados sem necessariamente compreender ou controlar seu funcionamento. O acesso torna-se amplo, mas o domínio permanece restrito. Em 2025, a UNCTAD destacou que poucos grupos empresariais concentram a economia digital global e que a participação combinada das cinco maiores multinacionais digitais nas vendas globais do setor mais que dobrou entre 2017 e 2025, passando de 21% para 48% [42]. A maior parte dos usuários interage com respostas, previsões e recomendações sem participar da construção dos modelos que produzem essas decisões.

Nesse arranjo, a inteligência artificial assume o papel de infraestrutura econômica. Empresas passam a competir não apenas por produtos ou processos produtivos, mas pela capacidade de integrar decisões automatizadas aos seus sistemas. Países passam a disputar acesso a tecnologias estratégicas que influenciam produtividade, segurança e inovação científica. A tecnologia torna-se, simultaneamente, ferramenta e condição de competitividade, inserindo-se no núcleo das relações econômicas e geopolíticas contemporâneas. Essa centralidade econômica aparece também nas projeções de mercado. A UNCTAD estima que o mercado global de IA pode crescer de US\$ 189 bilhões em 2023 para US\$ 4,8 trilhões em 2033 [43].

As assimetrias decorrentes desse modelo são significativas. Regiões com menor acesso a dados estruturados, capital tecnológico e recursos de pesquisa tendem a depender de sistemas desenvolvidos em contextos externos às suas realidades sociais, linguísticas e econômicas. Como resultado, soluções automatizadas podem não refletir necessidades locais, limitando sua eficácia e ampliando dependências estruturais. A questão central deixa de ser apenas o acesso à tecnologia e passa a envolver a capacidade de orientar seu desenvolvimento. Essa desigualdade aparece também na infraestrutura computacional global. Em análise recente, estimou-se que empresas norte-americanas controlam cerca de 70% da capacidade global de computação em IA, enquanto empresas chinesas controlam em torno de 10% [44].

A estrutura atual da inteligência artificial, portanto, caracteriza-se por uma distribuição desigual de poder cognitivo. A capacidade de definir padrões, estabelecer protocolos e orientar aplicações permanece concentrada em poucos atores institucionais. Mais do que uma ferramenta, a IA configura uma nova camada de organização da economia e da política internacional, influenciando decisões produtivas, científicas e administrativas em múltiplas escalas. Essa concentração também se materializa na infraestrutura física que sustenta a expansão da IA. A NVIDIA, principal fornecedora mundial de hardware para IA, registrou receita anual de US\$ 215,9 bilhões no ano fiscal de 2026, com US\$ 62,3 bilhões apenas em receita trimestral de data centers no quarto trimestre [45]. Esses números ilustram como a capacidade cognitiva automatizada está apoiada em uma base industrial e financeira igualmente concentrada.

4.2.3 Infraestrutura da inteligência artificial: da nuvem centralizada à borda distribuída

A configuração atual da inteligência artificial está profundamente associada à sua infraestrutura técnica. O avanço dos modelos de grande escala ocorreu inicialmente em ambientes altamente centralizados, baseados em grandes centros de processamento de dados e em arquiteturas computacionais capazes de sustentar cargas computacionais e energéticas sem precedentes. A dimensão material dessa infraestrutura já pode ser observada no consumo de eletricidade. Segundo a Agência Internacional de Energia, a demanda global de eletricidade dos data centers deverá mais que dobrar até 2030, alcançando cerca de 945 TWh, com a IA como principal vetor desse crescimento. A própria expansão geográfica dessa demanda também permanece concentrada: China e Estados Unidos responderão por quase 80% do crescimento do consumo elétrico de data centers até 2030 [46, 47].

Nesse modelo, a nuvem computacional consolidou-se como a principal plataforma de operação da inteligência artificial. A maior parte dos serviços de IA disponíveis no mundo depende de sistemas instalados em grandes centros de processamento, conectados a redes globais e operados por poucos provedores tecnológicos. Esse arranjo oferece enorme capacidade de escala e permite que aplicações sejam utilizadas por milhões de usuários simultaneamente. Entretanto, ele também reforça a lógica de centralização descrita anteriormente, na qual o acesso à tecnologia ocorre por meio de plataformas intermediadas. A magnitude econômica dessa infraestrutura aparece de forma clara no setor de hardware. A NVIDIA, principal fornecedora mundial de chips para IA, registrou receita anual de US\$ 215,9 bilhões no ano fiscal de 2026, com US\$ 62,3 bilhões em receita trimestral de data centers, evidenciando o peso industrial e financeiro do modelo centralizado [45].

Nos últimos anos, contudo, começa a surgir uma transformação gradual nessa arquitetura. O desenvolvimento de novos algoritmos, a otimização de modelos e a evolução de hardware especializado têm permitido que sistemas de inteligência artificial operem em ambientes computacionais progressivamente menores. O AI Index 2025 mostra que o custo de inferência para um sistema com desempenho equivalente ao GPT-3.5 caiu mais de 280 vezes entre novembro de 2022 e outubro de 2024. No nível do hardware, os custos vêm caindo cerca de 30% ao ano, enquanto a eficiência energética melhora aproximadamente 40% ao ano. No mesmo período, a diferença de desempenho entre modelos abertos e modelos fechados caiu de 8% para 1,7% em alguns benchmarks [35]. Esses dados indicam que a infraestrutura necessária para executar IA avançada começa a se tornar menos restrita do que no ciclo inicial dos grandes modelos.

Esse movimento inaugurou uma nova etapa na infraestrutura da IA, caracterizada pela expansão da chamada computação na borda. Nesse paradigma, parte significativa do processamento deixa de ocorrer exclusivamente em grandes centros de dados e passa a ser realizada próxima ao local onde os dados são gerados. Sensores, dispositivos inteligentes, equipamentos industriais e sistemas locais passam a incorporar capacidades de análise, inferência e tomada de decisão baseadas em inteligência artificial. O Banco Mundial observa que uma tendência promissora já está em curso em países de baixa e média renda por meio do que denomina Small AI, isto é, soluções mais acessíveis, específicas ao contexto e capazes de operar em smartphones e laptops comuns, com aplicações em agricultura, saúde e educação [37].

A distribuição dessas capacidades cria um ambiente híbrido, no qual grandes infraestruturas de nuvem continuam desempenhando papel central no treinamento de modelos e na coordenação de sistemas complexos, enquanto aplicações locais assumem funções de adaptação, personalização e resposta em tempo real. A inteligência artificial deixa de existir apenas como um serviço remoto e passa a se integrar diretamente aos ambientes em que os problemas ocorrem. Essa reconfiguração da infraestrutura abre espaço para novas formas de utilização da tecnologia. Universidades, centros de pesquisa regionais, pequenas empresas e organizações comunitárias passam a ter condições mais concretas de desenvolver aplicações baseadas em modelos adaptados às suas realidades. Sistemas treinados em dados locais podem responder a necessidades específicas de território, cultura e atividade econômica, ampliando a possibilidade de inovação distribuída [35, 37].

A evolução da infraestrutura, portanto, introduz uma tensão estrutural no ecossistema da inteligência artificial. O modelo centralizado que impulsionou os primeiros avanços continua relevante, mas a própria maturidade da tecnologia cria as condições para uma difusão mais ampla da capacidade computacional e da produção de conhecimento automatizado. A inteligência artificial, inicialmente concentrada em grandes centros tecnológicos, começa a adquirir características de uma infraestrutura distribuída, capaz de ser apropriada por diferentes atores sociais, científicos e econômicos. É justamente essa passagem parcial da nuvem centralizada para a borda distribuída que abre uma das vias mais promissoras para a democratização futura da IA [35, 37, 46, 47].

4.2.4 Forças estruturais e sinais de futuro no ecossistema da inteligência artificial

A evolução recente da inteligência artificial resulta da atuação simultânea de forças estruturais que orientam seu desenvolvimento e ampliam sua influência sobre sistemas científicos, econômicos e sociais. Essas forças atuam de maneira interdependente e moldam não apenas o ritmo da inovação tecnológica, mas também a forma como a IA se integra a outras tecnologias habilitadoras discutidas neste trabalho.

No plano tecnológico, a rápida evolução de algoritmos, arquiteturas computacionais e modelos fundacionais ampliou significativamente a capacidade das máquinas de interpretar linguagem, gerar conhecimento e apoiar decisões complexas. O avanço de modelos multimodais, agentes autônomos e sistemas capazes de interagir com ambientes digitais e físicos amplia o alcance da inteligência automatizada e cria novas possibilidades de aplicação em ciência, indústria e gestão pública. O AI Index 2025 registra, por exemplo, a rápida aproximação entre modelos abertos e fechados em benchmarks relevantes, além da forte redução do custo de inferência de sistemas com desempenho comparável ao GPT-3.5 entre 2022 e 2024, o que sinaliza um ambiente de inovação mais dinâmico e difuso [35].

No plano econômico, a inteligência artificial tornou-se um dos principais vetores de competitividade global. Investimentos massivos em infraestrutura computacional, formação de talentos e desenvolvimento de aplicações estão acelerando a incorporação da tecnologia em cadeias produtivas e serviços de alta complexidade. Esse movimento transforma a IA em um elemento central da economia digital e amplia sua capacidade de gerar novos mercados, modelos de negócio e ganhos de produtividade. A UNCTAD projeta que o mercado global de IA poderá crescer de US\$ 189 bilhões em 2023 para US\$ 4,8 trilhões em 2033, evidenciando a magnitude econômica da transformação em curso [43].

As dimensões políticas e geopolíticas também exercem influência decisiva sobre o ecossistema da inteligência artificial. Países e blocos econômicos buscam ampliar sua autonomia tecnológica por meio do desenvolvimento de infraestrutura computacional, controle de cadeias críticas de semicondutores e definição de padrões regulatórios internacionais. A capacidade de desenvolver e difundir sistemas avançados de IA passa a ser percebida como componente estratégico de soberania e poder global.

A dimensão ambiental, por sua vez, conecta o avanço da inteligência artificial às transformações na matriz energética. Sistemas de IA dependem de infraestrutura computacional intensiva em energia, enquanto a própria tecnologia contribui para otimizar redes elétricas, sistemas industriais e processos de monitoramento ambiental. A Agência Internacional de Energia projeta que o consumo global de eletricidade dos data centers deverá alcançar cerca de 945 TWh em 2030, mais que o dobro do nível atual, com a IA como principal motor desse crescimento [46, 47].

A convergência dessas forças tem produzido diversos sinais de futuro que indicam mudanças estruturais no papel da inteligência artificial nas próximas décadas. Entre os sinais mais relevantes destacam-se a disseminação de modelos de linguagem cada vez mais acessíveis, capazes de operar em diferentes ambientes computacionais, e a ampliação da capacidade de pesquisadores, empresas e organizações locais de desenvolver aplicações adaptadas às suas próprias realidades. Esse movimento sugere que a IA pode tornar-se, cada vez mais, uma tecnologia apropriável em múltiplas escalas, e não apenas um serviço controlado por grandes plataformas.

Outro fato portador de futuro é a emergência de sistemas autônomos capazes de executar tarefas complexas, interagir com múltiplas fontes de dados e apoiar decisões em contextos de elevada incerteza. Esses sistemas ampliam o alcance da inteligência artificial em áreas como pesquisa científica, gestão de infraestruturas críticas, monitoramento ambiental e desenvolvimento de soluções sociais.

Destaca-se também a crescente integração entre inteligência artificial e descoberta científica. Relatório das National Academies de 2025 aponta que foundation models podem complementar métodos computacionais tradicionais e acelerar a descoberta científica quando integrados de forma híbrida com modelagem física, estatística e validação rigorosa [48].

Esses sinais de futuro indicam que a inteligência artificial tende a assumir um papel cada vez mais central na convergência tecnológica contemporânea. Ao ampliar a capacidade de análise, modelagem e tomada de decisão em sistemas complexos, a IA atua como uma camada cognitiva capaz de acelerar avanços em diversas áreas do conhecimento e da economia. Nesse contexto, compreender as forças que moldam seu desenvolvimento e os sinais emergentes de transformação torna-se essencial para orientar estratégias capazes de transformar essa tecnologia em vetor de inovação, desenvolvimento e bem-estar social.

4.3 Tecnologias quânticas

As tecnologias quânticas não surgem como uma simples continuação da física clássica; elas representam uma mudança de paradigma. No domínio onde a matéria deixa de se comportar apenas como objeto e passa a se comportar também como possibilidade, emergem fenômenos que desafiam a intuição e reconfiguram o que entendemos como limite físico. Nesse território, partículas podem coexistir em múltiplos estados, conectar-se à distância e atravessar barreiras que, para o mundo macroscópico, seriam definitivas.

É nesse regime que a próxima geração de tecnologias se ancora. A superposição, o emaranhamento e o tunelamento quântico deixam de ser conceitos restritos ao laboratório e passam a sustentar novas possibilidades em computação, comunicação, sensores, metrologia, simulação, segurança, saúde, energia e ciência dos materiais. Mais do que uma nova família de dispositivos, trata-se de uma transformação capaz de deslocar fronteiras conceituais e abrir espaço para novos modelos de inovação, poder e desenvolvimento estratégico.

4.3.1 Da física quântica às tecnologias quânticas

As tecnologias recentes representam a segunda grande revolução da física quântica. A primeira nos deu lasers, ressonância magnética, LEDs, sensores e praticamente toda a eletrônica moderna. Agora, uma nova geração de aplicações está emergindo, baseada diretamente em fenômenos como superposição, emaranhamento e tunelamento quântico.

A superposição deixa de ser apenas um conceito abstrato e torna-se a base de arquiteturas computacionais capazes de explorar simultaneamente caminhos que, para máquinas clássicas, seriam percorridos um a um. O emaranhamento, antes tratado como curiosidade teórica, transforma-se em infraestrutura para comunicações com novos padrões de segurança. O tunelamento, que parecia um comportamento estranho da natureza, torna-se ferramenta para sensores capazes de detectar variações quase imperceptíveis no ambiente.

Esses efeitos, antes restritos ao laboratório, começam a moldar setores estratégicos como computação, comunicação, defesa, energia, saúde, materiais avançados e segurança. A mecânica quântica já responde, historicamente, por parcela relevante da economia mundial por meio da eletrônica, das telecomunicações e da saúde. A nova onda adiciona camadas de valor em software, serviços, propriedade intelectual, infraestrutura crítica e soberania tecnológica.

Mais do que uma nova família de dispositivos, as tecnologias quânticas indicam uma mudança de paradigma. Elas ampliam capacidades científicas, industriais e institucionais, mas também deslocam fronteiras conceituais e estratégicas. Por isso, compreender sua passagem da física fundamental para aplicações tecnológicas concretas é essencial para entender os cenários tecnológicos das próximas décadas.

4.3.2 Principais frentes das tecnologias quânticas

As tecnologias quânticas deixaram de ser apenas tema de laboratório e passaram a compor a agenda estratégica de inovação, segurança e competitividade econômica. Países e blocos como Estados Unidos, China, Reino Unido, Japão, Coreia do Sul, Canadá e União Europeia tratam essas tecnologias como ativos de segurança nacional e como elementos necessários para liderança tecnológica, econômica, política e militar.

Nesse contexto, governos, instituições científicas e tecnológicas e empresas vêm realizando grandes esforços para desenvolver e utilizar, em escala, ecossistemas de tecnologias quânticas. Entre as principais frentes destacam-se: computação quântica, comunicação quântica, sensoriamento e metrologia quânticos, e simulação quântica.

A computação quântica utiliza qubits, que podem representar 0 e 1 simultaneamente. Essa característica permite explorar possibilidades de cálculo que seriam extremamente difíceis ou inviáveis para supercomputadores clássicos em determinados tipos de problema. Empresas como IBM, Google e startups especializadas já operam protótipos funcionais, ainda que a utilidade prática em larga escala dependa de avanços em estabilidade, correção de erros, escalabilidade e desenvolvimento de aplicações.

A comunicação quântica explora propriedades quânticas para transmitir informações com novos padrões de segurança. Entre suas aplicações mais discutidas está a distribuição quântica de chaves, que pode criar formas de comunicação altamente resistentes à interceptação. Essa frente é considerada estratégica para segurança de dados, defesa, sistemas financeiros, redes críticas e soberania digital.

O sensoriamento e a metrologia quânticos utilizam efeitos quânticos para medir fenômenos com altíssima precisão. Esses sensores podem detectar campos magnéticos e gravitacionais muito pequenos, variações químicas e biológicas, movimentos, vibrações e alterações quase imperceptíveis no ambiente. Suas aplicações podem alcançar saúde, navegação, defesa, monitoramento ambiental, mineração, energia, agricultura e infraestrutura.

A simulação quântica utiliza sistemas quânticos controlados para simular outros sistemas quânticos difíceis de modelar em computadores clássicos, como moléculas, materiais, reações químicas e processos físicos complexos. Essa frente é especialmente relevante para a ciência dos materiais, a descoberta de medicamentos, o desenvolvimento de baterias, catalisadores, semicondutores e novas soluções energéticas.

Essas frentes mostram que as tecnologias quânticas não formam uma única tecnologia, mas um ecossistema. Seu impacto

dependerá da combinação entre pesquisa científica, infraestrutura, financiamento, formação de talentos, cadeias produtivas e capacidade de transformar fenômenos fundamentais da física em aplicações concretas para a sociedade.

4.3.3 Sinais de futuro nas tecnologias quânticas

Os sinais de futuro nas tecnologias quânticas indicam que esse campo deixou de ser apenas uma promessa científica e começa a se consolidar como uma fronteira estratégica de inovação, segurança e competitividade. Embora muitas aplicações ainda estejam em fase experimental ou inicial, os avanços recentes mostram que computação, comunicação, sensores e aplicações quânticas já ocupam espaço crescente nas agendas de governos, empresas e centros de pesquisa.

Um dos exemplos mais simbólicos é o chip quântico Willow, do Google. Segundo o texto original, esse chip resolveu um problema computacional de alta complexidade em menos de cinco minutos, tarefa que os supercomputadores mais rápidos do mundo levariam aproximadamente 10 septilhões de anos para realizar. Essa façanha, publicada em estudo na revista *Nature*, demonstra o potencial da computação quântica para lidar com problemas considerados insolúveis em prazos humanos. O desempenho do Willow está associado a fenômenos como superposição e emaranhamento quântico, além de avanços na redução de erros e na capacidade de resolução de problemas [27].

O cenário competitivo também vem se intensificando com novos anúncios de hardware. A startup holandesa QuantWare apresentou uma arquitetura para processadores supercondutores visando 10.000 qubits, um salto expressivo em relação aos dispositivos atuais. A QuEra promete atingir contagens semelhantes usando átomos ultrafrios. IBM e Quantinuum também mantêm cronogramas agressivos para sistemas de larga escala, consolidando uma disputa tecnológica real entre diferentes métodos de construção de computadores quânticos [28].

Apesar de o hardware estar avançando mais rapidamente que o software, também crescem os esforços para encontrar aplicações práticas. Entre os projetos em desenvolvimento estão simulações biomoleculares voltadas à saúde humana, modelagem de materiais para energia limpa e algoritmos para diagnóstico de doenças complexas. Além disso, marcos técnicos como a implementação do algoritmo de Shor em qubits lógicos indicam que os fundamentos para algoritmos quânticos complexos estão sendo validados em hardware real, ainda que permaneçam desafios relevantes de escala, estabilidade e correção de erros [28].

Avanços importantes também vêm ocorrendo nas comunicações quânticas. Cientistas desenvolveram um sistema estável de comunicação quântica segura, mantendo sinais quânticos criptografados por horas ao longo de mais de 120 quilômetros de fibra. A distribuição quântica de chaves, conhecida como QKD, é considerada uma das formas mais avançadas de criptografia quântica e pode abrir caminho para sistemas de comunicação mais seguros e escaláveis em ambientes reais [29].

Outra frente relevante é o desenvolvimento de métodos que utilizam frequências de luz para aprimorar a distribuição de chaves quânticas. Pesquisadores da Universidade Leibniz de Hannover propuseram uma abordagem capaz de reduzir complexidade, diminuir custos e contribuir para uma infraestrutura de internet quântica escalável e resistente à interceptação. Esse tipo de avanço reforça a importância das comunicações quânticas para segurança de dados, sistemas financeiros, defesa, redes críticas e soberania digital [30].

No campo da saúde, sensores quânticos vêm sendo apontados como tecnologias de grande potencial. De acordo com relatório do Consórcio de Desenvolvimento Econômico Quântico, esses sensores podem contribuir para diagnósticos médicos, incluindo detecção precoce de doenças como Alzheimer, análise do microbioma em tempo real, monitoramento fetal não invasivo, imagens cerebrais para apoio ao diagnóstico de epilepsia e lesões cerebrais traumáticas, além de informações sobre comportamento tumoral e eficácia de medicamentos [31]. Estimativas recentes indicam que tecnologias associadas à medicina quântica podem alcançar crescimento acelerado nos próximos anos, reforçando seu potencial para a saúde global [32].

As aplicações em navegação e defesa também indicam mudanças relevantes. A Boeing concluiu com sucesso um teste de voo de quatro horas utilizando uma unidade de medição inercial quântica para navegação sem GPS. A tecnologia, desenvolvida em colaboração com a AOSense, utiliza interferometria atômica para detecção precisa de rotação e aceleração, demonstrando o potencial de sensores quânticos para navegação confiável em ambientes onde o GPS esteja indisponível ou comprometido [33].

No campo militar, o Exército Chinês revelou projeto de arma de micro-ondas de 10 GW com tecnologia de disparo ultrarrápido baseada em superradiância. A superradiância é um fenômeno da física quântica que vem sendo estudado para sistemas de micro-ondas de alta potência. Segundo o texto original, esse tipo de tecnologia poderia produzir rajadas de energia ultracurtas em taxas de repetição extremamente elevadas, com possíveis aplicações contra satélites, drones e outros alvos [34].

Esses sinais de futuro mostram que as tecnologias quânticas já ultrapassaram o estágio de curiosidade científica. Elas começam a se transformar em sistemas de utilidade industrial, médica, comunicacional, militar e estratégica. Ainda que muitas promessas dependam de maturação técnica, redução de custos, regulação e formação de cadeias produtivas, os sinais atuais indicam que o setor entrou definitivamente na disputa tecnológica global.

4.3.4 Tecnologias quânticas, poder e apropriação estratégica

As tecnologias quânticas resultam não apenas de avanços científicos, mas também de pressões estruturais que reconfiguram competitividade, segurança e sustentabilidade em escala global. Países, blocos econômicos, instituições científicas e empresas passaram a tratá-las como infraestruturas críticas para o século XXI, com potencial de influenciar ciência, defesa, saúde, energia, comunicações, indústria, finanças e soberania tecnológica.

Estimativas recentes apontam para um mercado global de tecnologias quânticas com potencial massivo de criação de valor, podendo alcançar cifras na ordem de trilhões de dólares até 2035. O investimento privado também está em alta, com startups do setor atraindo quase US\$ 2 bilhões em 2024, um salto de 50% em relação ao ano anterior. A entrada de gigantes tecnológicos, como a NVIDIA, sinaliza que a indústria quântica é vista como uma fronteira estratégica para as grandes empresas de tecnologia.

Governos também enxergam a tecnologia quântica como pilar de segurança nacional e soberania tecnológica. A corrida entre Estados Unidos e China é um dos motores centrais desse processo. A China, por exemplo, elevou a tecnologia quântica à condição de uma de suas principais “indústrias do futuro” em seu 15º Plano Quinquenal. Esse movimento amplia a pressão geopolítica por cadeias de suprimentos resilientes e por menor dependência de adversários em materiais críticos, componentes de precisão, infraestrutura científica e talentos especializados.

A convergência entre forças tecnológicas, econômicas, políticas, geopolíticas e ambientais está transformando as tecnologias quânticas de conceitos teóricos em sistemas de utilidade industrial e estratégica. Os avanços recentes indicam que o setor ultrapassou um ponto sem retorno e entrou definitivamente na disputa industrial global.

Para os territórios, esse debate pode parecer distante, mas não deve ser ignorado. Mesmo que muitas aplicações quânticas ainda estejam concentradas em grandes centros científicos, seus efeitos futuros podem alcançar áreas essenciais como segurança de dados, diagnóstico em saúde, monitoramento ambiental, navegação, energia, ciência dos materiais e infraestrutura digital. Por isso, a apropriação estratégica dessas tecnologias começa pelo letramento, pela formação de talentos, pela participação em redes científicas e pela capacidade de compreender como essas transformações podem afetar economias locais, serviços públicos, cadeias produtivas e políticas de desenvolvimento.

Nesse sentido, as tecnologias quânticas constituem parte do núcleo de um novo regime tecnoeconômico, no qual energia avançada, inteligência artificial e sistemas quânticos tornam-se infraestruturas críticas para os cenários de curto, médio e longo prazo. A questão central não é apenas quando essas tecnologias chegarão ao cotidiano dos territórios, mas quem terá capacidade de compreendê-las, regulá-las, adaptá-las e orientar seus usos em benefício coletivo.

4.4 Por que a combinação dessas tecnologias pode ser revolucionária

O impacto mais profundo das tecnologias habilitadoras discutidas neste documento não está apenas em cada uma delas isoladamente, mas na forma como podem se combinar. Energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas tendem a formar uma infraestrutura tecnológica integrada, capaz de ampliar capacidades científicas, produtivas, econômicas, institucionais e territoriais. É nessa convergência que reside uma das principais forças de transformação das próximas décadas.

4.4.1 Energia + inteligência artificial

A inteligência artificial depende de energia para existir em escala. Seus modelos, data centers, redes e dispositivos exigem infraestrutura elétrica robusta, estável e cada vez mais eficiente. Ao mesmo tempo, a IA pode transformar o próprio setor energético, apoiando a previsão de demanda, a otimização de redes elétricas, a manutenção preditiva, a redução de perdas, a integração de fontes renováveis e a gestão de sistemas distribuídos. Essa combinação pode ser estratégica para territórios que buscam reduzir custos, ampliar segurança energética e participar da transição energética de forma mais ativa. O gargalo, porém, está na infraestrutura: sem energia confiável, conectividade, dados de qualidade e pessoas formadas, a IA tende a permanecer concentrada onde já existe maior capacidade instalada [46, 47].

4.4.2 Inteligência artificial + tecnologias quânticas

A inteligência artificial pode acelerar pesquisas em tecnologias quânticas, apoiando o desenho de experimentos, a análise de grandes volumes de dados, a correção de erros e a busca por novas arquiteturas computacionais. Em sentido inverso, tecnologias quânticas podem ampliar capacidades de simulação, segurança, otimização, ciência dos materiais e descoberta científica, criando novas possibilidades para a própria IA. Essa interação ainda está em fase inicial, mas aponta para um futuro em que sistemas inteligentes e sistemas quânticos possam se complementar. O desafio será evitar que essa capacidade fique restrita a poucos laboratórios, empresas e países, reforçando desigualdades de acesso ao conhecimento e à infraestrutura tecnológica.

4.4.3 Energia + tecnologias quânticas

As tecnologias quânticas também podem influenciar profundamente o futuro da energia. Sensores quânticos podem melhorar o monitoramento de redes, reservatórios, estruturas críticas e sistemas ambientais. Simulações quânticas podem apoiar a descoberta de novos materiais para baterias, catalisadores, semicondutores, células solares, hidrogênio e fusão nuclear. Comunicações quânticas podem contribuir para a segurança de infraestruturas energéticas críticas. Porém, essa combinação depende de gargalos materiais e industriais: minerais críticos, semicondutores, materiais avançados, cadeias produtivas especializadas e capacidade de pesquisa aplicada.

4.4.4 A convergência tripla

Quando energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas se combinam, elas podem formar uma nova infraestrutura de poder econômico, científico, produtivo e geopolítico. A energia sustenta a capacidade computacional; a IA acelera a pesquisa, a gestão e a tomada de decisão; e as tecnologias quânticas podem ampliar fronteiras de simulação, segurança, sensores e materiais. Essa convergência pode reorganizar setores inteiros, desde saúde, educação, agricultura, indústria e defesa até gestão pública, clima, energia e ciência.

Para os territórios, essa convergência suscita uma questão central: ela será apropriada apenas por grandes empresas, potências globais e centros tecnológicos ricos, ou também poderá fortalecer comunidades, pequenos municípios, organizações sociais e economias locais? A resposta dependerá de infraestrutura, dados, talentos, governança, regulação, financiamento e participação social. Por isso, compreender a combinação dessas tecnologias não é apenas um exercício de futuro; é uma condição para disputar quais futuros serão possíveis.

5 Cenários de apropriação tecnológica local: comunidades, territórios e futuro na próxima década

A literatura em estudos de futuro enfatiza que cenários não são previsões, mas narrativas estruturadas que permitem explorar incertezas, mapear interdependências e antecipar possíveis trajetórias de transformação [2, 3, 4]. Neste documento, os cenários são utilizados como ferramenta de preparação estratégica para comunidades, organizações sociais, educadores e gestores locais.

Na próxima década, a convergência entre energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas tende a influenciar de forma crescente a economia, o trabalho, a educação, a saúde, a gestão pública, a comunicação, a segurança, a produção de alimentos e a organização dos territórios. A inteligência artificial deve se consolidar como infraestrutura crítica; soluções energéticas avançadas tendem a ganhar escala; e as tecnologias quânticas, ainda distantes do cotidiano da maioria das comunidades, devem ampliar sua importância em áreas como ciência, segurança de dados, sensores, saúde, materiais e educação científica.

O objetivo desta seção não é afirmar exatamente o que acontecerá, mas discutir como diferentes comunidades podem ser afetadas por essas transformações e quais caminhos de preparação podem ser construídos desde agora. A questão central é: os territórios serão apenas impactados por tecnologias produzidas fora deles ou poderão compreender, adaptar e orientar essas tecnologias de acordo com suas próprias prioridades?

5.1 Comunidades negras urbanas

No horizonte da próxima década, comunidades negras urbanas poderão sentir os efeitos da inteligência artificial e da transformação energética em áreas como trabalho, renda, educação, mobilidade, segurança, cultura, empreendedorismo e acesso a serviços públicos. A IA poderá reorganizar ocupações, automatizar processos, alterar formas de contratação e modificar a relação das pessoas com serviços digitais. Ao mesmo tempo, a energia avançada poderá influenciar custos de moradia, transporte, equipamentos públicos, conectividade e iniciativas produtivas locais.

Os riscos principais estão ligados à exclusão digital, à precarização do trabalho, à vigilância algorítmica, ao uso de dados sem controle comunitário e à dependência de plataformas externas. Caso essas tecnologias avancem sem participação social, podem reforçar desigualdades já existentes nas cidades. Por outro lado, também podem abrir oportunidades para formação profissional, empreendedorismo digital, economia criativa, produção cultural, organização de dados comunitários, melhoria de serviços públicos e eficiência energética em escolas, centros culturais, associações, terreiros, cooperativas e equipamentos sociais.

Os caminhos de preparação passam pela criação de laboratórios locais de tecnologia, formação de jovens em inteligência artificial, dados e energia, apoio a negócios digitais de base comunitária, fortalecimento de observatórios populares sobre mobilidade, segurança, educação e trabalho, além de projetos-piloto de energia solar, eficiência energética e conectividade em espaços coletivos. A prioridade deve ser formar pessoas antes de consumir soluções prontas.

5.2 Comunidades tradicionais: quilombolas, indígenas, ribeirinhas e afins

Para comunidades tradicionais, a próxima década poderá trazer impactos diretos sobre território, soberania alimentar, saúde, educação, comunicação, proteção ambiental, memória, cultura e defesa de direitos. A inteligência artificial poderá apoiar a organização de dados comunitários, o mapeamento de problemas locais, a produção de materiais educativos, a tradução e preservação de línguas, o monitoramento ambiental e a sistematização de informações sobre saúde, alimentação e território. A energia avançada, especialmente em modelos distribuídos e comunitários, poderá ampliar autonomia, reduzir custos, melhorar comunicação, fortalecer escolas, postos de saúde, produção local e sistemas de abastecimento.

Os riscos, entretanto, são significativos. Tecnologias podem chegar aos territórios de fora para dentro, sem consulta, sem governança local e sem respeito aos modos próprios de vida. Há risco de captura de dados, exposição de conhecimentos tradicionais, apagamento cultural, dependência de fornecedores externos, vigilância territorial e projetos de transição energética que não beneficiem diretamente as comunidades. Por isso, o uso dessas tecnologias precisa estar subordinado ao direito ao território, à consulta, à autonomia e à proteção dos saberes tradicionais.

Os caminhos de preparação incluem criar protocolos comunitários de governança de dados, formar agentes tecnológicos locais, desenvolver mapas e bases de informação controladas pelas próprias comunidades, estabelecer parcerias com universidades e organizações confiáveis, iniciar projetos-piloto em energia comunitária, segurança alimentar, educação contextualizada, saúde, comunicação e monitoramento climático. As tecnologias quânticas, nesse contexto, entram principalmente como tema de letramento científico e atenção estratégica, sobretudo em sensores, segurança de dados e monitoramento ambiental.

5.3 Pequenos municípios e gestores locais

Nos pequenos municípios, a convergência tecnológica poderá afetar diretamente a gestão pública. A inteligência artificial poderá apoiar planejamento territorial, saúde, educação, assistência social, defesa civil, compras públicas, atendimento ao cidadão, organização de dados e identificação de prioridades. A energia avançada poderá contribuir para reduzir custos, ampliar resiliência, fortalecer equipamentos públicos e criar novas oportunidades de desenvolvimento econômico local.

O risco principal é que municípios com baixa capacidade técnica passem a contratar soluções prontas, caras e pouco adaptadas à realidade local. A dependência de fornecedores externos, a ausência de governança de dados, a falta de formação de servidores e a baixa conectividade podem transformar a tecnologia em mais um fator de desigualdade. Também há risco de exclusão de populações vulneráveis caso sistemas automatizados sejam implementados sem transparência, participação e controle social.

Os caminhos de preparação devem começar com diagnóstico tecnológico municipal: quais dados existem, quais problemas são prioritários, quais equipes precisam ser formadas e quais serviços poderiam ser melhorados com tecnologia. Em seguida, gestores locais podem criar projetos-piloto de IA em áreas específicas, como saúde, educação, defesa civil ou gestão energética, sempre com avaliação pública e participação social. Também é estratégico investir em energia distribuída para escolas, unidades de saúde, sistemas de abastecimento, iluminação pública e prédios municipais, articulando tecnologia, sustentabilidade e redução de custos.

5.4 Educadores e organizações sociais

Educadores e organizações sociais terão papel central na apropriação tecnológica local. Na próxima década, a inteligência artificial deverá estar cada vez mais presente na produção de textos, imagens, diagnósticos, traduções, materiais pedagógicos, organização de dados e apoio à aprendizagem. A energia avançada será tema essencial para discutir clima, transição justa, infraestrutura, trabalho e desenvolvimento. As tecnologias quânticas, embora ainda distantes da aplicação cotidiana em muitos territórios, devem entrar na agenda educacional como parte do letramento científico necessário para compreender as novas fronteiras da ciência e da tecnologia.

Os riscos estão ligados ao uso superficial da IA, à reprodução de desigualdades educacionais, à dependência de ferramentas privadas, à desinformação, ao enfraquecimento da autoria e à falta de formação crítica. Se educadores e organizações sociais não se apropriarem do debate, a tecnologia poderá entrar nas escolas e projetos sociais apenas como ferramenta de consumo, sem reflexão sobre poder, dados, trabalho, território e futuro.

Os caminhos de preparação incluem criar trilhas formativas em inteligência artificial crítica, energia e tecnologias emergentes; desenvolver clubes de tecnologia com jovens; produzir materiais didáticos contextualizados; formar multiplicadores comunitários; promover oficinas sobre dados, ética, clima, energia e futuro do trabalho; e aproximar escolas, universidades, organizações sociais e comunidades. O papel desses atores é traduzir temas complexos para a realidade local, conectando conhecimento técnico, saberes territoriais e ação coletiva.

5.5 Recomendações gerais para a próxima década

A partir dos cenários discutidos nas seções anteriores, é possível identificar desafios, oportunidades e caminhos de preparação comuns aos diferentes territórios. O Quadro 1 sintetiza esses elementos e organiza, de forma comparativa, as principais ações estratégicas para cada grupo analisado.

Tabela 1: Quadro-resumo dos cenários de apropriação tecnológica local na próxima década.

Grupo analisado	Desafios principais	Oportunidades	Caminhos de preparação
Comunidades negras urbanas	Exclusão digital, precarização do trabalho, vigilância algorítmica, uso de dados sem controle comunitário e dependência de plataformas externas.	Formação em IA, empreendedorismo digital, economia criativa, produção cultural, organização de dados comunitários e eficiência energética em espaços coletivos.	Criar laboratórios locais de tecnologia, formar jovens em IA, dados e energia, apoiar negócios digitais de base comunitária e desenvolver projetos-piloto de energia e conectividade.
Comunidades tradicionais: quilombolas, indígenas, ribeirinhas e afins	Captura de dados, apagamento cultural, tecnologias impostas de fora para dentro, vigilância territorial, dependência energética e exposição de saberes tradicionais.	Energia comunitária, monitoramento territorial, preservação de línguas e memórias, educação contextualizada, soberania alimentar, saúde e comunicação local.	Criar protocolos de governança de dados, formar agentes tecnológicos locais, desenvolver mapas comunitários, estabelecer parcerias confiáveis e iniciar projetos-piloto em energia, clima, alimentação e cultura.
Pequenos municípios e gestores locais	Baixa capacidade técnica, contratação acrítica de soluções prontas, dependência de fornecedores, ausência de governança de dados e risco de exclusão de populações vulneráveis.	IA aplicada à saúde, educação, assistência social, defesa civil, planejamento territorial, gestão energética, compras públicas e melhoria de serviços municipais.	Realizar diagnóstico tecnológico municipal, capacitar servidores, organizar dados públicos, criar pilotos de IA em serviços prioritários e investir em energia distribuída para equipamentos públicos.
Educadores e organizações sociais	Uso superficial da IA, reprodução de desigualdades educacionais, dependência de ferramentas privadas, desinformação e falta de formação crítica.	Educação contextualizada, popularização científica, formação de jovens, produção de materiais locais, clubes de tecnologia e redes de inovação social.	Criar trilhas formativas em IA crítica, energia e tecnologias emergentes, formar multiplicadores, produzir materiais didáticos territoriais e aproximar escolas, universidades, organizações e comunidades.

A preparação tecnológica dos territórios não deve começar pela compra de ferramentas, mas pela formação de pessoas, pela definição de prioridades e pela criação de capacidades locais. Antes de adotar soluções externas, comunidades, organizações e governos locais precisam compreender seus próprios problemas, organizar seus dados, identificar riscos e construir formas

de governança.

Algumas recomendações são comuns a todos os públicos. A primeira é investir em letramento tecnológico, especialmente em inteligência artificial, energia e dados. A segunda é mapear problemas reais dos territórios, evitando projetos genéricos que não dialogam com necessidades locais. A terceira é organizar dados próprios com governança comunitária, proteção de informações sensíveis e participação social. A quarta é começar com projetos-piloto pequenos, avaliáveis e adaptáveis.

Também é fundamental criar parcerias com universidades, institutos de pesquisa, empresas responsáveis, organizações sociais e financiadores. Essas parcerias devem fortalecer capacidades locais, e não substituir o protagonismo dos territórios. Para a próxima década, IA e energia devem ser tratadas como agendas imediatas de preparação. As tecnologias quânticas devem entrar principalmente pela educação, pela popularização científica e pelo acompanhamento estratégico de suas aplicações futuras.

O cenário desejável é aquele em que comunidades, pequenos municípios, educadores e organizações sociais deixam de ser apenas usuários finais de tecnologias externas e passam a atuar como formuladores de problemas, produtores de dados, articuladores de projetos e protagonistas da apropriação tecnológica local. Nos próximos dez anos, os territórios que desenvolverem letramento, governança, projetos-piloto, redes de cooperação e capacidade crítica estarão em melhores condições de transformar tecnologias habilitadoras em instrumentos de autonomia, inclusão e desenvolvimento.

6 Conclusão: o futuro também precisa ser construído pelos territórios

A convergência entre energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas já está em curso. Seus efeitos alcançarão governos, empresas, universidades, escolas, organizações sociais, comunidades e territórios, mesmo aqueles que hoje parecem distantes desse debate. A questão central, portanto, não é apenas acompanhar o avanço dessas tecnologias, mas compreender como elas irão reorganizar oportunidades, riscos, formas de trabalho, cadeias produtivas, serviços públicos, educação, saúde, comunicação, segurança, cultura e desenvolvimento local.

Ao longo da história, tecnologias habilitadoras abriram caminhos para transformações profundas. Elas mudaram modos de produzir, comunicar, governar, aprender e viver. O momento atual possui uma característica particular: energia, inteligência artificial e tecnologias quânticas avançam de forma simultânea, densa e convergente. Essa combinação pode ampliar capacidades científicas, produtivas e institucionais, mas também pode aprofundar desigualdades se permanecer concentrada em poucos países, empresas, centros urbanos e grupos sociais.

Tecnologia não é neutra. Ela envolve poder, dados, infraestrutura, recursos, trabalho, cultura, soberania e capacidade de decisão. Por isso, os territórios não devem ser tratados apenas como mercados consumidores ou espaços de aplicação de soluções prontas. Comunidades negras urbanas, comunidades tradicionais, pequenos municípios, educadores, organizações sociais e lideranças locais precisam participar da definição dos problemas, da produção dos dados, da escolha das ferramentas, da governança dos usos e da avaliação dos impactos.

O futuro tecnológico não será construído apenas em laboratórios distantes, grandes empresas ou centros de poder global. Ele também será disputado nas escolas, nas comunidades, nos municípios, nas organizações sociais, nos territórios tradicionais, nos coletivos juvenis, nas universidades públicas, nas redes de cuidado, nos projetos de energia comunitária, nos dados locais e nas experiências concretas de inovação social.

A próxima década será decisiva. Os territórios que investirem em letramento tecnológico, formação de pessoas, governança de dados, projetos-piloto, redes de cooperação e capacidade crítica estarão em melhores condições de transformar tecnologias habilitadoras em instrumentos de autonomia, inclusão, sustentabilidade e desenvolvimento. Já aqueles que permanecerem fora desse debate correm o risco de serem apenas impactados por decisões tomadas por outros.

Este documento, portanto, é um convite à preparação e à ação coletiva. Energia avançada, inteligência artificial e tecnologias quânticas não devem ser apropriadas apenas por grandes empresas, potências globais e centros urbanos ricos. Elas precisam ser compreendidas, questionadas, adaptadas e orientadas também pelos territórios. Porque o futuro não deve ser apenas previsto. Ele precisa ser disputado, planejado e construído com participação social, justiça e protagonismo local.

Referências

Referências gerais, tecnologias habilitadoras e estudos de futuro

- [1] RIFKIN, Jeremy. Sociedade com custo marginal zero: a internet das coisas. São Paulo: M. Books do Brasil, 2016.
- [2] GODET, Michel. From Anticipation to Action: A Handbook of Strategic Prospective. Paris: UNESCO, 1994.
- [3] SCHWARTZ, Peter. The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World. New York: Currency Doubleday, 1996.
- [4] PORTER, Alan L. et al. Technology futures analysis: toward integration of the field and new methods. Technological Forecasting and Social Change, v. 71, n. 3, p. 287-303, 2004.

Energia avançada, hidrogênio, SMRs e fusão nuclear

- [5] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY; PLOS ONE. Artigo publicado em 11 ago. 2025. PLOS ONE, 2025. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0320676>. Acesso em: 09 fev. 2026.
- [6] LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. The Sun. Berkeley: LBNL. Disponível em: wlap.physics.berkeley.edu. Acesso em: 10 mar. 2024.
- [7] COLLINS, Leigh. US hydrogen hub seeks developers able to deliver clean H2 for \$1/kg. Hydrogen Insight, 2026. Disponível em: <https://www.hydrogeninsight.com/production/us-hydrogen-hub-seeks-developers-able-to-deliver-clean-h2-for-1-kg/2-1-1931819>. Acesso em: 26 jan. 2026.
- [8] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. USGS releases first-ever map of potential geologic hydrogen in the U.S. Reston: USGS, jan. 2025. Disponível em: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/usgs-releases-first-ever-map-potential-geologic-hydrogen-us>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- [9] PINJARI, Syedvali. Liquid Organic Hydrogen Carriers. Fuel Cell Store, out. 2022. Disponível em: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/component-information/liquid-organic-hydrogen-carriers>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- [10] FICHE, Alisson. Novos motores a combustão japoneses da Toyota, Mazda e Subaru desafiam o futuro dos carros totalmente elétricos. Click Petróleo e Gás, 03 jun. 2025. Disponível em: <https://en.clickpetroleoegas.com.br/novos-motores-a-combustao-japoneses-da-toyota-mazda-e-subaru-desafiam-o-futuro-dos-carros-totalmente-eletricos-revelam-do-que-a-eletrificacao-completa-pode-nao-ser-tao-viavel-afch/>. Acesso em: 20 set. 2025.
- [11] AKRE, Sejal. Hydrogen Hubs Market Research Report. Market Research Future, fev. 2026. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/hydrogen-hubs-market-21977>. Acesso em: 04 mar. 2026.
- [12] TRIPATHI, Aman. US firm reactor to supply hydrogen and electricity. Interesting Engineering, 22 jun. 2025. Disponível em: <https://interestingengineering.com/energy/us-firm-reactor-supply-hydrogen-electricity>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- [13] KAJAL, Kapil. World's first mass-produced nuclear reactor. Interesting Engineering, 03 jun. 2025. Disponível em: <https://interestingengineering.com/energy/worlds-first-mass-produced-nuclear-reactor>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- [14] FORD, Neil. US Army microreactors set to boost wider nuclear industry. Reuters, 24 nov. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/us-army-microreactors-set-to-boost-wider-nuclear-industry--reeii-2025-11-24/>. Acesso em: 05 dez. 2025.
- [15] DE CHANT, Tim. Meta signs deals with three nuclear companies for 6-plus GW of power. TechCrunch, 09 jan. 2026. Disponível em: <https://techcrunch.com/2026/01/09/meta-signs-deals-with-three-nuclear-companies-for-6-plus-gw-of-power/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- [16] SIMPLY WALL ST. NuScale Power TVA deal puts SMR ambitions in focus. Yahoo Finance, 06 fev. 2026. Disponível em: <https://finance.yahoo.com/news/nuscale-power-tva-deal-puts-001901267.html>. Acesso em: 20 fev. 2026.
- [17] STIFFLER, Lisa. Gates-backed TerraPower gets NRC green light for safety in construction of its first nuclear plant. GeekWire, 01 dez. 2025. Disponível em: <https://www.geekwire.com/2025/gates-backed-terrapower-gets-nrc-green-light-for-safety-in-construction-of-its-first-nuclear-plant/>. Acesso em: 03 dez. 2025.
- [18] BLUM, Jordan. Nuclear fusion: holy grail of power. Yahoo Finance, 02 out. 2025. Disponível em: <https://finance.yahoo.com/news/nuclear-fusion-holy-grail-power-170000773.html>. Acesso em: 18 nov. 2025.

- [19] WINFREY, Sarah. US firm makes major breakthrough. Yahoo News, 01 dez. 2025. Disponível em: <https://www.yahoo.com/news/articles/us-firm-makes-major-breakthrough-051500152.html>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- [20] SATTLER, Leslie. Startup makes major breakthrough in pursuit of fusion energy. Yahoo News, 29 nov. 2025. Disponível em: <https://www.yahoo.com/news/articles/startup-makes-major-breakthrough-pursuit-051500576.html>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- [21] DANIEL, Alex. Commercializing nuclear fusion power. The Cool Down, 06 nov. 2025. Disponível em: <https://www.thecooldown.com/green-tech/commercializing-nuclear-fusion-power-doe/>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- [22] BUDIN, Jeremiah. Focused Energy laser fusion power. The Cool Down, 30 nov. 2024. Disponível em: <https://www.thecooldown.com/green-tech/focused-energy-laser-fusion-power/>. Acesso em: 08 set. 2025.
- [23] BENNETT, Noah. Germany goes fusion first: company pushes bold plan to build world's first operational nuclear fusion power plant. Sustainability Times, 20 jun. 2025. Disponível em: <https://www.sustainability-times.com/energy/germany-goes-fusion-first-company-pushes-bold-plan-to-build-worlds-first-operational-nuclear-fusion-power-plant/>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- [24] WORLD NUCLEAR NEWS. Google backs fusion power. World Nuclear News, 01 jul. 2025. Disponível em: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/google-backs-fusion-power>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- [25] TRIPATHI, Aman. US nuclear fusion material development. Interesting Engineering, 14 dez. 2025. Disponível em: <https://interestingengineering.com/energy/us-nuclear-fusion-material-development>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- [26] MARITIME FUSION. Y Combinator-backed Maritime Fusion raises \$4.5M from Trucks VC, Paul Graham. PR Newswire, 24 nov. 2025. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/news-releases/y-combinator-backed-maritime-fusion-raises-4-5m-from-trucks-vc-paul-graham-302624213.html>. Acesso em: 29 nov. 2025.

Tecnologias quânticas

- [27] SWAYNE, Matt. Google's quantum chip sparks debate on multiverse theory. The Quantum Insider, 11 ago. 2025. Disponível em: <https://thequantuminsider.com/2024/12/16/googles-quantum-chip-sparks-debate-on-multiverse-theory/>. Acesso em: 19 fev. 2026.
- [28] ROSA, Vika. A computação quântica atravessa um ponto sem retorno em 2025 e pode entrar definitivamente na disputa industrial. Xataka Brasil, 29 dez. 2025. Disponível em: <https://www.xataka.com.br/informatica/a-computacao-quantica-atraves-a-atraves-a-um-ponto-sem-retorno-em-2025-e-pode-entrar-definitivamente-na-disputa-industrial>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- [29] CHANGCHUN INSTITUTE OF OPTICS, FINE MECHANICS AND PHYSICS. Quantum communication system remains stable over 120 kilometers of fiber. Science Daily, 09 maio 2026. Disponível em: <https://www.sciencedaily.com/releases/2026/05/260508003129.htm>. Acesso em: 15 maio 2026.
- [30] LEIBNIZ UNIVERSITY HANNOVER. Quantum encryption breakthrough uses light and color to create an unhackable internet. SciTechDaily, 14 fev. 2025. Disponível em: <https://scitechdaily.com/quantum-encryption-breakthrough-uses-light-and-color-to-create-an-unhackable-internet/>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- [31] SWAYNE, Matt. How can quantum sensors build better health? Report details potential challenges of quantum sensors for biomedical applications. The Quantum Insider, 09 maio 2025. Disponível em: <https://thequantuminsider.com/2024/12/12/how-can-quantum-sensors-build-better-health-report-details-potential-challenges-of-quantum-sensors-for-biomedical-applications/>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- [32] TEPANYAN, Hayk. Quantum medicine. BlueQubit, 18 mar. 2026. Disponível em: <https://www.bluequbit.io/blog/quantum-medicine>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- [33] SWAYNE, Matt. Boeing's quantum-based navigation system takes flight in historic test. The Quantum Insider, 09 ago. 2024. Disponível em: <https://thequantuminsider.com/2024/08/09/boeings-quantum-based-navigation-system-takes-flight-in-historic-test/>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- [34] CHEN, Stephen. PLA unveils 10GW microwave weapon blueprint with ultra-fast firing superradiance tech. South China Morning Post, 31 jul. 2025. Disponível em: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3319874/pla-unveils-10gw-microwave-weapon-blueprint-ultra-fast-firing-superradiance-tech>. Acesso em: 05 out. 2025.

Inteligência artificial, desenvolvimento, trabalho e infraestrutura digital

- [35] STANFORD INSTITUTE FOR HUMAN-CENTERED ARTIFICIAL INTELLIGENCE. AI Index Report 2025. Stanford: Stanford University, 2025. Disponível em: <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report>. Acesso em: 19 mar. 2026.

- [36] WORLD BANK. Digital Progress and Trends Report 2025: AI Foundations. Washington, DC: World Bank, 2025. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/publication/dptr2025-ai-foundations>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [37] WORLD BANK. Small AI, Big Impact: Harnessing Artificial Intelligence for Development. World Bank Blogs, 2025. Disponível em: <https://blogs.worldbank.org/en/voices/small-ai-big-impact-harnessing-artificial-intelligence-for-development>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [38] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Health and care workforce: global strategy on human resources for health: workforce 2030. Geneva: WHO, 2024. Disponível em: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB156/B156_15-en.pdf. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [39] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Generative AI and jobs: a 2025 update. Geneva: ILO, 2025. Disponível em: <https://www.ilo.org/publications/generative-ai-and-jobs-2025-update>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [40] UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. Languages in education. Paris: UNESCO, 2025. Disponível em: <https://www.unesco.org/en/languages-education>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [41] GEORGIEVA, Kristalina. AI will transform the global economy. Let's make sure it benefits humanity. IMF Blog, Washington, DC, 14 jan. 2024. Disponível em: <https://www.imf.org/en/blogs/articles/2024/01/14/ai-will-transform-the-global-economy-lets-make-sure-it-benefits-humanity>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [42] UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. Highly concentrated digital markets put consumers at risk. Here's how to change course. Geneva: UNCTAD, 08 jul. 2025. Disponível em: <https://unctad.org/news/highly-concentrated-digital-markets-put-consumers-risk-heres-how-change-course>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [43] UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. AI market projected to hit \$4.8 trillion by 2033, emerging as dominant frontier technology. Geneva: UNCTAD, 07 abr. 2025. Disponível em: <https://unctad.org/news/ai-market-projected-hit-48-trillion-2033-emerging-dominant-frontier-technology>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [44] KAHL, Colin H. The Myth of the AI Race. Foreign Affairs, 2026.
- [45] NVIDIA. NVIDIA announces financial results for fourth quarter and fiscal 2026. Santa Clara: NVIDIA, 25 fev. 2026. Disponível em: <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-announces-financial-results-for-fourth-quarter-and-fiscal-2026>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [46] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. AI is set to drive surging electricity demand from data centres while offering the potential to transform how the energy sector works. Paris: IEA, 10 abr. 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/news/ai-is-set-to-drive-surging-electricity-demand-from-data-centres-while-offering-the-potential-to-transform-how-the-energy-sector-works>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [47] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy and AI. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- [48] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. Foundation Models for Scientific Discovery and Innovation: Opportunities Across the Department of Energy. Washington, DC: The National Academies Press, 2025. Disponível em: <https://www.nationalacademies.org/projects/DEPS-BMSA-24-03>. Acesso em: 19 mar. 2026.