

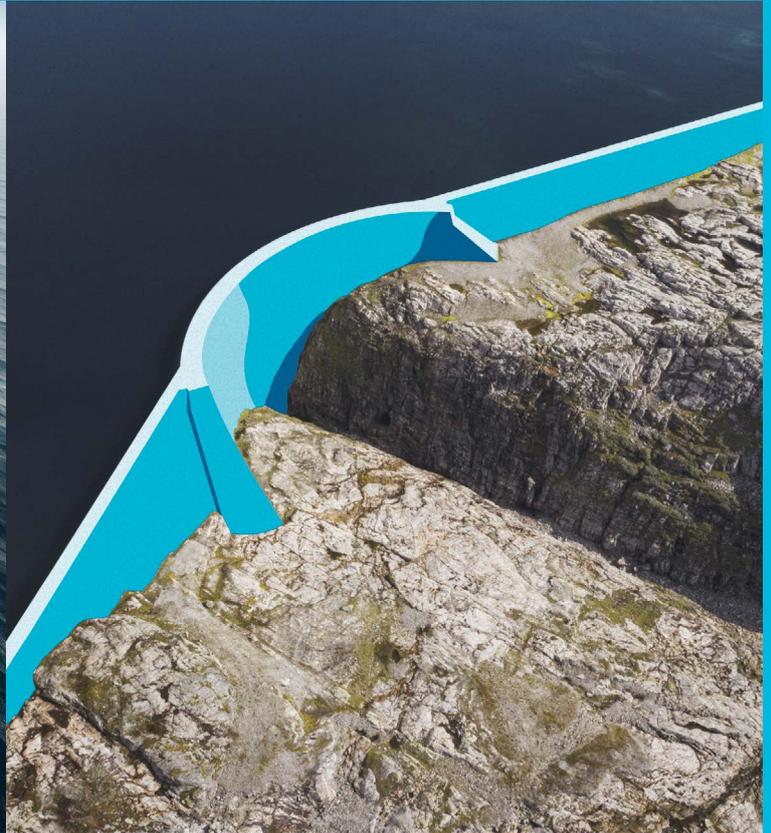
Low Emissions Scenario

A transição de energia em um mundo fragmentado | p. 22

A eletrificação é a principal solução cliática | p. 28

Energias renováveis competitivas impulsionam a transição energética | p. 38

Uma análise aprofundada (deep dive) na transição Energética Europeia | p. 66



Low Emissions Scenario



Índice

Capítulo 1: As apostas aumentaram na transição energética	8
Imperativo da segurança energética	10
A crise energética acelera a implantação de energias renováveis	11
Ainda competitiva apesar do aumento de custo	12
Resiliência das cadeias de suprimentos	13
Fragmentação global e nacional	17
Novos objetivos de política com impactos incertos	17
Medidas urgentes são necessárias para enfrentar a crise climática e, ao mesmo tempo, garantir a sustentabilidade no contexto mais amplo	18
Mercados, tecnologia, e reforço de política necessários	20
Capítulo 2: A transição energética em um mundo fragmentado	22
Cenários da Statkraft	24
A demanda de energia primária diminui até 2050 no Low Emissions Scenario	27
A eletrificação é a principal solução climática	28
Descarbonização do setor de edificações com bombas de calor e eficiência energética	30
Descarbonização do setor de transporte com eletricidade e hidrogênio	32
Descarbonização do setor industrial	34
Energias renováveis competitivas impulsionam a transição energética	38
As energias renováveis substituem a energia fóssil em todos os cenários, mas a velocidades diferentes	38
A energia solar fotovoltaica é vencedora em todos os cenários	40
A energia eólica onshore é a fonte de energia mais econômica em muitas regiões	40
O crescimento da energia eólica offshore acelera na década de 2030 – mais afetado pelo atraso na transição	41
FOCO: Energia Eólica Offshore	42
A energia hidrelétrica proporciona uma flexibilidade valiosa ao sistema	44
Os combustíveis fósseis diminuem em todos os cenários	47
FOCO: Geração de energia nuclear	48
Os custos e os longos prazos limitam o papel da energia nuclear no Low Emissions Scenario	50
FOCO: Rede de energia	52
A flexibilidade no sistema de energia é crucial para a transição energética	54
O papel do hidrogênio	56
Emissões: Evitar emissões fósseis é a única forma viável de limitar o aquecimento global	61
Uma análise aprofundada (deep dive) na transição Energética Europeia	66
A eletrificação nos setores de uso final é fundamental para atingir as metas climáticas da União Europeia	67
A energia eólica e solar podem ultrapassar 75% em participação de mercado até 2050	70
As metas climáticas da União Europeia são desafiadoras, mas alcançáveis.	72
3 Anexos	74



Otimismo em tempos de incerteza

Christian Rynning-Tønnesen

Estamos vivendo uma era de mudanças sem precedentes. Os conflitos atuais, como a invasão da Ucrânia pela Rússia e a guerra entre o Hamas e Israel, e ainda a crescente tensão entre a China e os EUA, estão remodelando a dinâmica geopolítica global. As principais tendências desde 1990 estão mudando devido a tensões geopolíticas e à fragmentação econômica impulsionada pelas políticas. Além disso, enfrentamos também desafios como a inflação elevada, o aumento das taxas de juros e mudanças demográficas significativas, com a Índia tornando-se a nação mais populosa do mundo.

Simultaneamente, os eventos climáticos extremos estão aumentando em frequência e gravidade em todo o mundo. Em 2023, temperaturas elevadas recorde, juntamente com condições de seca e vento, contribuíram para incêndios florestais e chuvas fortes causaram graves inundações. Tais acontecimentos destacam as consequências urgentes das alterações climáticas. É agora mais crítico do que nunca conter a trajetória atual.

Estas mudanças têm um impacto profundo na transição energética, conduzindo a uma maior incerteza. No entanto, ao invés de travar a transição energética, observamos uma aceleração da implantação de energias renováveis devido a um maior destaque na segurança de suprimentos, nas preocupações climáticas e na crescente competitividade das energias solar e eólica.

Em resposta à crescente incerteza, a 8ª edição do Low Emissions Scenario da Statkraft introduz dois cenários adicionais para explorar os desafios e consequências de caminhos alternativos: a “Disputa Clean Tech”, influenciada por uma transição mais protecionista nos EUA, UE e China, e o “Atraso na Transição”, onde menos atenção climática em tempos de aumento de conflitos e custo de vida leva a uma transição mais lenta.

A análise da Statkraft aponta para a continuação da transição energética em todos os cenários. A acessibilidade da energia solar fotovoltaica, da energia eólica onshore, das baterias e das bombas de calor está a impulsionar mudanças transformadoras na produção e no consumo de energia. Nossas descobertas sugerem que a energia eólica e solar continuarão a superar a concorrência

das tecnologias fósseis em todos os três cenários. Devido ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis, estas tecnologias mantiveram a sua competitividade apesar da inflação. Agora, estamos testemunhando que os custos estão começando a diminuir novamente.

O Low Emissions Scenario continua a ser um cenário otimista mas realista, em grande parte impulsionado por uma tendência mais forte a favor de mais energia solar fotovoltaica e eólica do que nos anos anteriores. O Low Emissions Scenario prevê que as energias renováveis irão suprir mais de 80% da demanda mundial de energia em 2050, mais do que duplicando ao longo do período devido à profunda eletrificação dos edifícios, dos transportes e da indústria. Com isto como cenário de fundo, podemos assumir um aquecimento ligeiramente inferior a 2 graus.

Mesmo que o Low Emissions Scenario da Statkraft se torne realidade, as emissões globais ainda não conseguirão se alinhar com um futuro net zero. Embora as energias renováveis estejam crescendo rapidamente em todo o mundo, continua a ser necessário superar as crescentes incertezas externas e os obstáculos internos. Para acelerar a transição energética, devemos expandir estratégias comprovadas. Na COP 28, o foco na triplicação da capacidade renovável é crucial, dada a relação custo-eficácia da energia eólica e solar como medidas de mitigação. Até agora, a transição energética ocorreu predominantemente no mundo desenvolvido e na China. No futuro, é crucial acelerar também a transição energética em regiões com acesso limitado ao capital e à tecnologia, onde se espera a maior parte do crescimento da demanda de energia. Além disso, precisamos investir e desenvolver medidas de mitigação menos maduras, como o hidrogênio e a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, na sigla em inglês).

Ainda há uma pequena janela de oportunidade para acelerar a trajetória atual. Alcançar emissões net zero até 2050 exige uma ação acelerada em todas as frentes e a colaboração global é vital. O Low Emissions Scenario da Statkraft que apontamos ainda está ao nosso alcance. Vamos aproveitar essa dinâmica para nos impulsionar ainda mais em direção a um futuro net zero.



SUMÁRIO DO Low Emissions Scenario 2023

A tecnologia limpa competitiva e a segurança energética impulsionam a descarbonização

As tecnologias de energia limpa, como a energia eólica e solar, e as baterias registaram uma redução de custos de 70% a 90% na última década, tornando-as competitivas com os combustíveis fósseis. Os veículos elétricos a bateria e as bombas de calor também estão se aproximando da paridade de custos. Além disso, a recente turbulência do mercado e as tensões geopolíticas aumentaram o foco global na segurança energética, estimulando políticas mais fortes para a implantação de energias renováveis e a eficiência energética.

Neste contexto, os projetos do Low Emissions Scenario prevêem forte crescimento da energia solar e eólica, mesmo além do Relatório de 2022. Até 2050, espera-se energia solar e eólica aumentem 22 e 12 vezes respectivamente, impulsionadas pela competitividade e apoiada pela segurança energética e políticas climáticas. Eletrificação profunda e hidrogênio verde nos transportes, indústrias e edifícios mais do que duplicam consumo global de eletricidade até 2050 no Low Emissions Scenario. O consumo de energia primária, por outro lado, diminui ligeiramente devido ao aumento eficiência energética e eletrificação.

O Low Emissions Scenario projeta uma trajetória de emissões que limita o aquecimento global a menos de 2°C, a um ritmo um pouco mais rápido do que as projeções do ano passado.

O Low Emissions Scenario da Statkraft é uma avaliação otimista, mas realista, das tendências energéticas globais até 2050. Ele é desenvolvido por analistas que se basearam nos estudos de 50 especialistas internos para modelar detalhadamente os mercados de energia em 21 países.

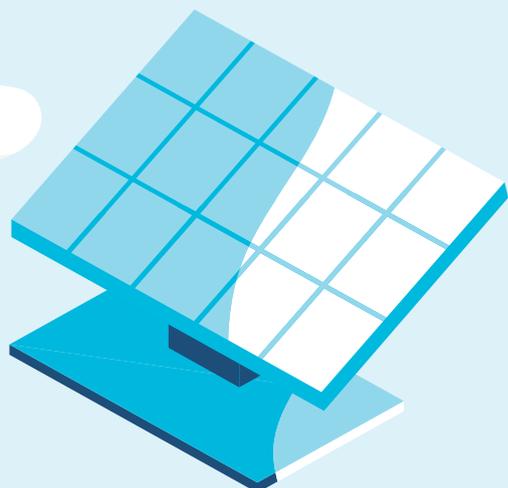
Pela primeira vez no relatório e em resposta à crescente incerteza global, o Low Emissions Scenario deste ano apresenta dois cenários adicionais: Disputa Clean Tech rumo ao Net Zero e O Atraso de Transição.

Cenários adicionais exploram caminhos de transição alternativos

A crescente fragmentação global poderá desafiar o ritmo e o alcance da transição energética. Até agora, a mitigação das alterações climáticas tem dependido de um amplo comércio global e de cadeias de abastecimento adequadas de tecnologias energéticas limpas e de matérias-primas. A colaboração global também reforça o desenvolvimento tecnológico, a eficiência econômica e o financiamento necessário para a transição energética. Emergência de novos desafios sociais e aumento da tensão geopolítica poderá, no entanto, levar a mais protecionismo, o que poderá afetar a transição energética global mais do que anteriormente previsto. Com os atuais desafios econômicos e geopolíticos, a incerteza em torno do ritmo da transição energética global parece maior do que antes. Neste contexto, a Statkraft analisa dois cenários adicionais denominados cenários de Atraso na Transição e Disputa Clean Tech no relatório deste ano

No cenário de Disputa Clean Tech, uma corrida alimentada por subsídios pode estimular uma transição para energia limpa, mas a custos mais elevados e com atrasos

No cenário de Disputa Clean Tech, potências globais como os EUA, a UE e a China envolvem-se numa competição alimentada por subsídios pelo domínio nas cadeias de suprimentos de energia limpa. Neste cenário, destaca-se a construção e salvaguarda de cadeias de suprimentos regionais, resultando num menor comércio global de materiais e tecnologias cruciais para a transição energética. Uma transição liderada por subsídios pode levar a uma transição menos eficiente com parcelas mais altas de tecnologias como nuclear e Captura, Utilização e Armazenamento (CCUS) de carbono. Apesar dos atrasos e custos mais elevados, a transição energética ganha gradualmente no cenário de Disputa Clean Tech, à medida que as cadeias de suprimentos regionais e, até 2050, os volumes de energia solar e eólica crescem 20 e 10 vezes, respectivamente. No entanto, este cenário resulta num aumento de 20% em emissões de CO₂ relacionadas com a energia em 2050, em comparação com o Low Emissions Scenario e 15% superior em emissões cumulativas de 2021 a 2050.





No cenário de Atraso na Transição, grandes conflitos ou agitação social poderiam atrasar uma transição para energia limpa, mas não impedi-la

O cenário de Atraso na Transição assume que a transição energética ocupa uma posição inferior na agenda política, uma vez que o conflito, a agitação social e os custos de vida mais elevados têm precedência. À medida que as tensões geopolíticas globais aumentam, as preocupações nacionais e de segurança energética passam a ocupar o primeiro plano, e as tecnologias de combustíveis fósseis com custos iniciais mais baixos continuam a constituir uma parte maior do mix energético durante mais tempo. Isto poderá retardar a transição energética, mas não a interromperá totalmente, uma vez que a energia eólica e solar com boa relação custo-benefício permanece competitiva. Mesmo neste cenário, a produção de energia solar e eólica crescerá 6,5 vezes até 2050. A eletrificação desenvolve-se a um ritmo reduzido em comparação com o Low Emissions Scenario, especialmente em setores onde ainda são necessárias políticas proativas fortes. Tecnologias menos maduras, como o hidrogênio e o CCUS, dificilmente serão implementadas até 2050. Isto resulta em emissões de CO₂ relacionadas com a energia 130% mais elevadas em 2050, em comparação com o Low Emissions Scenario, e emissões cumulativas 30% mais elevadas de 2021 a 2050.

Para atingir Net Zero até 2050, precisamos mais de tudo e mais rápido

No Low Emissions Scenario, as emissões são reduzidas em quase 70% até 2050, mas não conseguem cumprir as metas do Acordo de Paris. Para atingir estas metas mais elevadas, a implantação da energia eólica e a energia solar deve acelerar mais rapidamente. A lacuna na geração eólica e solar quando comparamos o Roteiro Net Zero da AIE e o Low Emissions Scenario da Statkraft é de aproximadamente 20% em 2030, e também em 2050. A eletrificação deve avançar mais rapidamente e ser mais ampla, com a energia utilizada de forma mais eficiente. A principal diferença entre o Low Emissions Scenario e o Roteiro Net Zero da AIE reside, no entanto, na implantação de tecnologias imaturas como o hidrogênio e o CCUS em setores difíceis de reduzir. Estas tecnologias crescem duas a três vezes mais rápido no Roteiro Net Zero da IEA.

A transição energética europeia é inevitável

O relatório investiga especificamente a transição para energias limpas do sistema energético europeu. Em todos os cenários, a transição energética é inevitável. No Low Emissions Scenario, a Europa cumpre as suas metas RePower EU para 2030 em reduzir as emissões em 55% sem o gás russo. Isto é conseguido principalmente através da implantação de energias renováveis, eficiência energética e eletrificação nos transportes e no aquecimento. A implantação da energia solar pode atingir ou mesmo exceder as metas estabelecidas no REPowerEU, enquanto a meta da energia eólica parece mais desafiadora. A energia eólica e solar que substitui os combustíveis fósseis é a solução dominante para a redução de emissões até 2030, enquanto a eletrificação e o crescimento do hidrogênio são mais fortes na segunda metade do período até 2050.

Uma transição para energia limpa atende múltiplos objetivos

Um mundo em conflito pode acrescentar obstáculos substanciais ao caminho para um sistema energético limpo. Ao mesmo tempo, a crise energética ilustrou os riscos e a vulnerabilidade da dependência de combustíveis fósseis fornecidos por regimes instáveis. Este relatório mostra que uma transição energética rápida e limpa, como no Low Emissions Scenario, pode mitigar as alterações climáticas e contribuir para o desenvolvimento de sistemas energéticos resilientes. A energia renovável é a chave para o trilema energético da sustentabilidade, acessibilidade e segurança do abastecimento. O relatório conclui também que mesmo num mundo mais conflituoso, o crescimento das energias renováveis permanece forte e não se reverte em nenhum cenário; pode apenas progredir em um ritmo mais lento.



CAPÍTULO 1

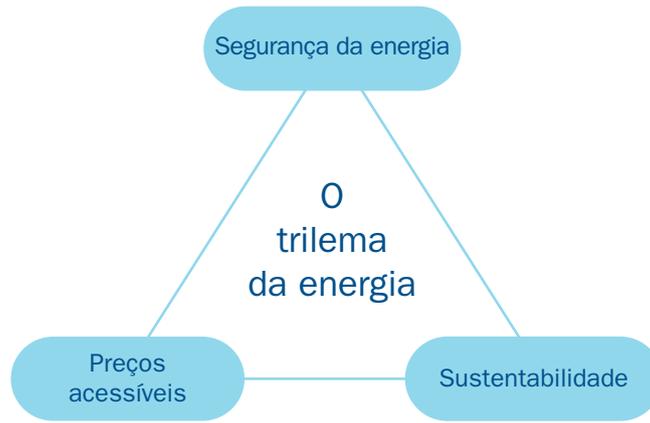
As apostas aumentaram na transição energética



Local: Ringedals Dam, Noruega

A forma como geramos e utilizamos energia está em transição, impulsionada principalmente pelas políticas climáticas e pela queda do custo das tecnologias renováveis. Além disso, a Europa atravessa uma crise energética devido à redução do fornecimento de gás fóssil russo, o que realça a importância crítica de uma energia segura e acessível. Tal como afirma a Agência Internacional de Energia (AIE): uma transição para uma energia limpa baseada na eletricidade renovável e na eletrificação não só reduzirá as emissões, mas também garantirá um fornecimento de energia resiliente.¹ Sendo assim, não é surpreendente que a implantação de energias renováveis tenha acelerado em resposta à

crise energética. Planos ambiciosos como o REPowerEUⁱ e o IRAⁱⁱ nos Estados Unidos demonstram um forte compromisso com esta transição. Pela primeira vez na história (fora de uma recessão), o crescimento da energia limpa deverá exceder o crescimento do consumo de eletricidade em 2023, sugerindo que as emissões globais do setor energético atingirão o pico este ano.² Este ano, a energia solar deverá atrair pela primeira vez mais capital do que a produção de petróleo, com um total de 1,7 trilhões a serem investidos globalmente em tecnologias limpas em 2023, o que representa 70% mais do que o investimento em combustíveis fósseis no mesmo período.³



Ao mesmo tempo, a mudança de um sistema energético intensivo em combustível para um sistema energético intensivo em materiais cria novas dependências. O domínio da China nas cadeias de abastecimento de energia limpa destaca novas preocupações, tais como a necessidade de diversificação e de maior desenvolvimento da indústria doméstica limpa. Outro motivo de preocupação é como a parte em desenvolvimento do mundo corre o risco de ficar para trás na transição energética. Os países em desenvolvimento estão lutando para acompanhar o ritmo, principalmente devido ao acesso limitado ao capital e às tecnologias de energia limpa. Os investimentos continuam concentrados nos países desenvolvidos e na China. O aumento da tensão geopolítica também levou a uma maior atenção global sobre estas preocupações, uma vez que menos colaboração e comércio globais poderiam atrasar a transição energética necessária. Para além da crise climática, muitos ecossistemas estão sob pressão a nível mundial e a poluição continua prejudicando a saúde e o ambiente. A necessidade de enfrentar estes desafios foi colocada no topo da agenda no âmbito do acordo de biodiversidade de Kunming-Montreal.⁴

Ao longo do último ano, os acontecimentos climáticos extremos em todo o mundo serviram mais uma vez como lembretes das implicações potencialmente terríveis das alterações climáticas. Em 2023, a Terra viveu os três meses mais quentes já registrados.⁵ Houve ondas de calor que bateram recordes no Norte de África, no Japão e na Turquia. O tempo quente, ventoso e seco provocou incêndios florestais em Espanha, na Grécia e no Havai. Na Noruega, o fenómeno meteorológico extremo "Hans" provocou graves inundações. As alterações climáticas já estão tornando os seguros mais caros e há partes do mundo que simplesmente não podem ser seguradas devido ao aumento da frequência e da gravidade das catástrofes naturais.⁶ Segundo o IPCC, a temperatura global já é 1,1 °C mais elevada em comparação com os tempos pré-industriais e continuará a aumentar enquanto o carbono fóssil for emitido para a atmosfera.⁷

Embora o trilema clássico da segurança energética, da acessibilidade económica e da sustentabilidade ambiental (Figura 1) continue a ser muito relevante, existem também outros compromissos importantes numa transição energética sustentável. A sustentabilidade ambiental não diz respeito apenas ao clima, mas também à utilização dos solos, à poluição e à proteção das espécies ameaçadas. A segurança do aprovisionamento não é apenas uma questão técnica, mas também uma questão de interesse

para a segurança nacional e regional. E a acessibilidade dos preços não diz respeito apenas aos consumidores, mas também ao custo total do fornecimento de energia à sociedade. De certa forma, todas as partes do trilema da energia se tornaram mais importantes e, por conseguinte, é ainda mais necessário lidar corretamente com os compromissos. Ao mesmo tempo, devido à necessidade urgente de ação climática, o custo da inação é elevado.

As energias renováveis oferecem, em grande medida, uma solução holística para o clássico trilema energético, que aborda os três aspectos cruciais: segurança energética, sustentabilidade ambiental e acessibilidade. Contribui para diversificar as fontes de energia, reduzir a dependência de fornecedores específicos, reduzir os gases com efeito de estufa para cumprir os objetivos ambientais e aumentar a competitividade em termos de custos para os consumidores. Mesmo que um sistema energético baseado na geração renovável variável seja vulnerável às flutuações no fornecimento de eletricidade provocadas pelas condições meteorológicas, existem várias soluções que lidam com estas flutuações. No geral, as energias renováveis desempenham um papel fundamental no reforço da segurança, da sustentabilidade e da viabilidade económica no nosso Low Emissions Scenario.

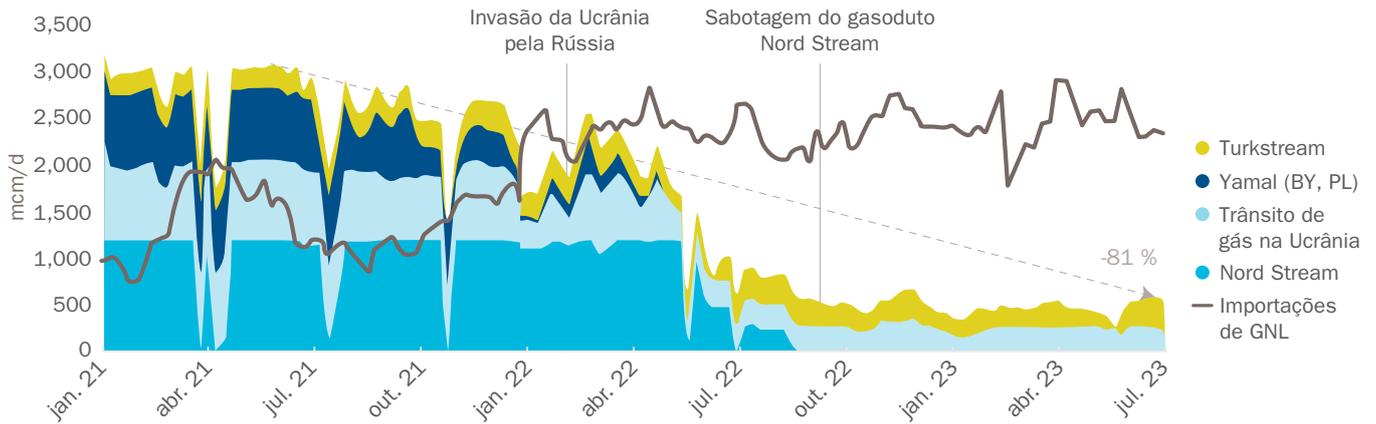
Nos capítulos seguintes, discutimos tendências importantes que podem afetar a transição para energia limpa, ao longo das três facetas do trilema energético: segurança energética, sustentabilidade ambiental e acessibilidade.

As mudanças geopolíticas dos últimos anos provocaram uma maior incerteza política. Para explorar os resultados potenciais, introduzimos dois cenários adicionais no relatório deste ano: um cenário de corrida aos subsídios, ou "Disputa Clean Tech", no qual experimentaremos menos comércio global, mas um grande impulso para a transição energética, e o "Cenário de Atraso na Transição", que implicaria menos comércio global e uma transição energética mais lenta. No entanto, a extrapolação das tendências mais importantes na transição energética ainda aponta para uma rápida mudança para as energias limpas.

ⁱ O plano REPowerEU, lançado em maio de 2022, é um plano ambicioso para reduzir rapidamente a procura de gás, numa tentativa de reduzir a dependência da Europa das importações de gás russo, acelerando a eficiência energética, a eletrificação, o hidrogénio e a implantação de energias renováveis. O plano baseia-se no pacote legislativo "Fit for 55" da UE, lançado em julho de 2021, que é o quadro da UE sobre como alcançar as metas climáticas para 2030 e 2050.

ⁱⁱ Veja o Fact Box "Resposta dos EUA: IRA".

2 Fluxos de gás fóssil russo e importações de GNL para a Europa, 2021 a julho de 2023 (mcm/d)⁸



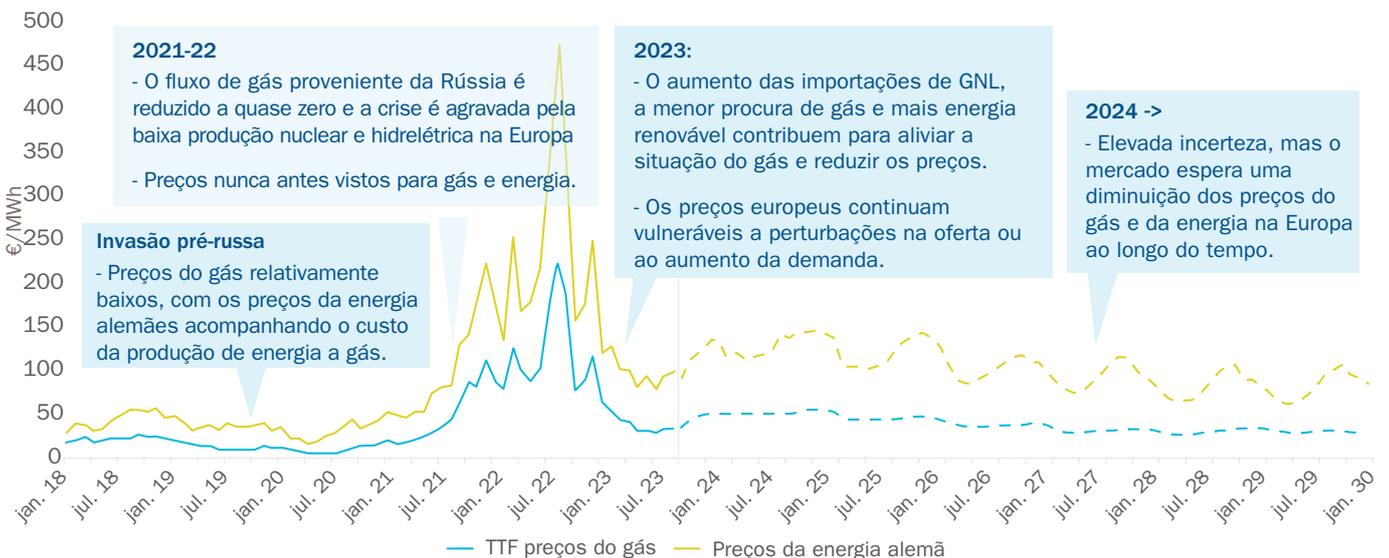
Imperativo de segurança energética

Low Emissions Scenario

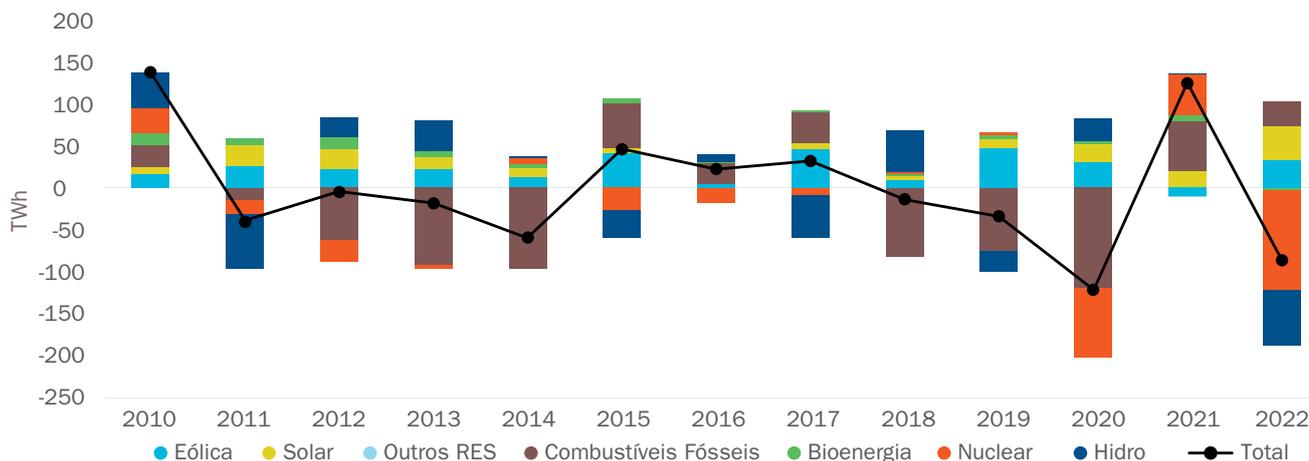
Durante a recuperação econômica mundial após a COVID-19, os mercados de vários combustíveis foram afetados por um equilíbrio apertado entre a oferta e a demanda. Durante 2021 e 2022, grandes partes do mundo viveram uma crise energética, à medida que as exportações russas de gás para a Europa começaram a diminuir antes da invasão da Ucrânia (Figura 2). De abril de 2021 a julho de 2022, os preços do gás e da energia subiram dramaticamente, atingindo um aumento surpreendente de oito e sete vezes, respectivamente. Este cenário energético desafiador foi ainda agravado por um declínio na produção de energia nuclear. Isto foi causado principalmente por problemas nas centrais nucleares francesas e pelos baixos níveis de precipitação nos Alpes em 2022, o que também levou à redução da produção das centrais hidrelétricas.¹⁰ TA combinação destes fatores agravou ainda mais a crise energética na Europa, causando uma pressão significativa no fornecimento de energia.

Em 2022, o sistema energético europeu esteve sob uma tensão incrível, uma vez que a Europa correu o risco de esgotar o seu abastecimento de gás durante o pico da demanda no inverno. No entanto, a redução da demanda por parte das habitações residenciais e da indústria, juntamente com a mudança de combustível e o aumento das importações de GNL, evitou uma escassez de energia na Europa. O inverno bastante ameno também reduziu o risco de escassez, uma vez que o número de dias de aquecimento na UE diminuiu 12% em 2022 em comparação com 2021. Atualmente, o balanço europeu do gás antes da época de inverno de 2023/24 encontra-se num estado menos grave do que nos dois anos anteriores, devido ao reforço das reservas de gás em antecipação de uma maior demanda.¹¹ No entanto, um inverno excepcionalmente frio e/ou novas perturbações na cadeia de suprimentos poderão colocar a Europa, mais uma vez, numa posição precária em termos do seu aprovisionamento energético.

3 Preços europeus do gás e preços alemães da eletricidade 2018 - 2023 e preços a prazo a partir de setembro de 2023 (€/MWh)⁹



4 Mudança anual na geração de energia (TWh) por tecnologia na UE de 2010 a 2022¹⁴



A crise energética acelera a implantação de energias renováveis

A instalação de capacidade renovável até agora acelerou durante e após a crise energética, apesar dos custos inflacionados. Por exemplo, a capacidade renovável registrou um aumento recorde em 2022, com aproximadamente 340 GW adicionados em todo o mundo.¹² A energia solar fotovoltaica foi o principal contribuinte para este crescimento, devido a adições líquidas de quase 220 GW – sendo a China e a UE responsáveis por 85% deste crescimento. Nos EUA, o crescimento da capacidade diminuiu, como resultado da luta do país com as cadeias de suprimentos e do aumento dos custos. O crescimento da capacidade eólica global também caiu, uma vez que as restrições da COVID na China e as limitações da cadeia de suprimentos dificultaram o crescimento. A tendência continuou em 2023, com o investimento solar aumentando e o investimento eólico diminuindo.¹³

A Europa instalou 50 GW de nova capacidade renovável em 2022, o que contribuiu para uma redução do consumo de gás em cerca de 11 bilhões de metros cúbicos.¹⁵ Entretanto, apesar do impressionante crescimento das energias renováveis na Europa, a produção de energia a gás e a carvão também aumentou ligeiramente em 2022, devido à luta do continente contra interrupções nucleares e à baixa produção hídrica. Até agora, em 2023, a geração de combustíveis fósseis é substancialmente menor do que no mesmo período do ano passado.¹⁶

Segundo a AIE, os investimentos em energia limpa aumentaram US\$ 206 bilhões de 2021 a 2022, atingindo um total de US\$ 1.617 bilhões. A AIE espera que isto continue em 2023, com investimentos no valor de US\$ 1.740 bilhões, o equivalente a US\$ 1,70 em energia limpa por cada dólar investido em combustíveis fósseis. Há cinco anos, essa proporção era de 1 para 1.¹⁷

2023



A capacidade renovável experimentou um aumento recorde em 2022, com aproximadamente 340 GW adicionados em todo o mundo. A energia solar fotovoltaica foi a principal contribuidora para este crescimento, devido a adições líquidas de quase 220 GW

Local: Alcalá de Guadaíra, Seville, Spain



Em 2021, 96% dos wafers de painéis solares e 92% dos ânodos para baterias de carros elétricos foram produzidos na China

Ainda competitiva apesar do aumento de custos

O forte crescimento das energias renováveis materializou-se apesar do aumento dos custos causado pela inflação e pela perturbação da cadeia de suprimentos. Na verdade, o aumento extremo dos preços dos combustíveis fósseis contribuiu para preservar e até aumentar a competitividade das energias renováveis. Em 2022, o custo nivelado médio ponderado global da eletricidade (LCOE) foi 52% e 29% inferior às soluções de combustíveis fósseis mais baratas para novos projetos eólicos onshore e novos projetos solares fotovoltaicos, respectivamente.¹⁸ Recentemente,

os preços de importantes insumos de tecnologia renovável, como aço e polissilício, diminuíram desde o pico em 2021.¹⁹ Com o tempo, isto contribuirá para moderar ainda mais o custo da tecnologia renovável.

O investimento suficiente nas cadeias de suprimentos de energia limpa é fundamental para a redução contínua de custos. Para algumas partes da cadeia de suprimentos de energia limpa, como a energia solar fotovoltaica e a produção de baterias, a capacidade de produção anunciada já está em linha com o que é necessário no Cenário Net Zero da AIE.²⁰

No entanto, para outras partes das cadeias de suprimentos, são necessários níveis de investimento mais elevados. Embora existam vários tipos de riscos de abastecimento de materiais de tecnologia limpa, existem amplos recursos disponíveis para cobrir o crescimento futuro da demanda. Dados os sinais de preços corretos e o apoio governamental, um investimento suficiente estimulará o crescimento da oferta. Longos prazos de produção podem resultar em preços voláteis dos metais nos próximos anos, mas é pouco provável que isto seja suficientemente significativo para inviabilizar a transição energética.

Resiliência nas cadeias de suprimentos

A maior ênfase na segurança do abastecimento direcionou mais atenção para a criação de cadeias de abastecimento renováveis em áreas onde a China detém hoje uma posição dominante – particularmente na fabricação, refinação e produção de diversas matérias-primas críticas. Para a refinação de minerais de terras raras e nas cadeias de suprimentos de energia solar e baterias, a China tem um domínio quase total. Em 2021, 96% dos wafers de painéis solares e 92% dos ânodos para baterias de carros elétricos foram produzidos na China (Figura 5). Cerca de 90% dos minerais de terras raras também foram refinados na China também.²² Do lado da mineração, espera-se maior diversificação com a entrada de novas minas no mercado nos

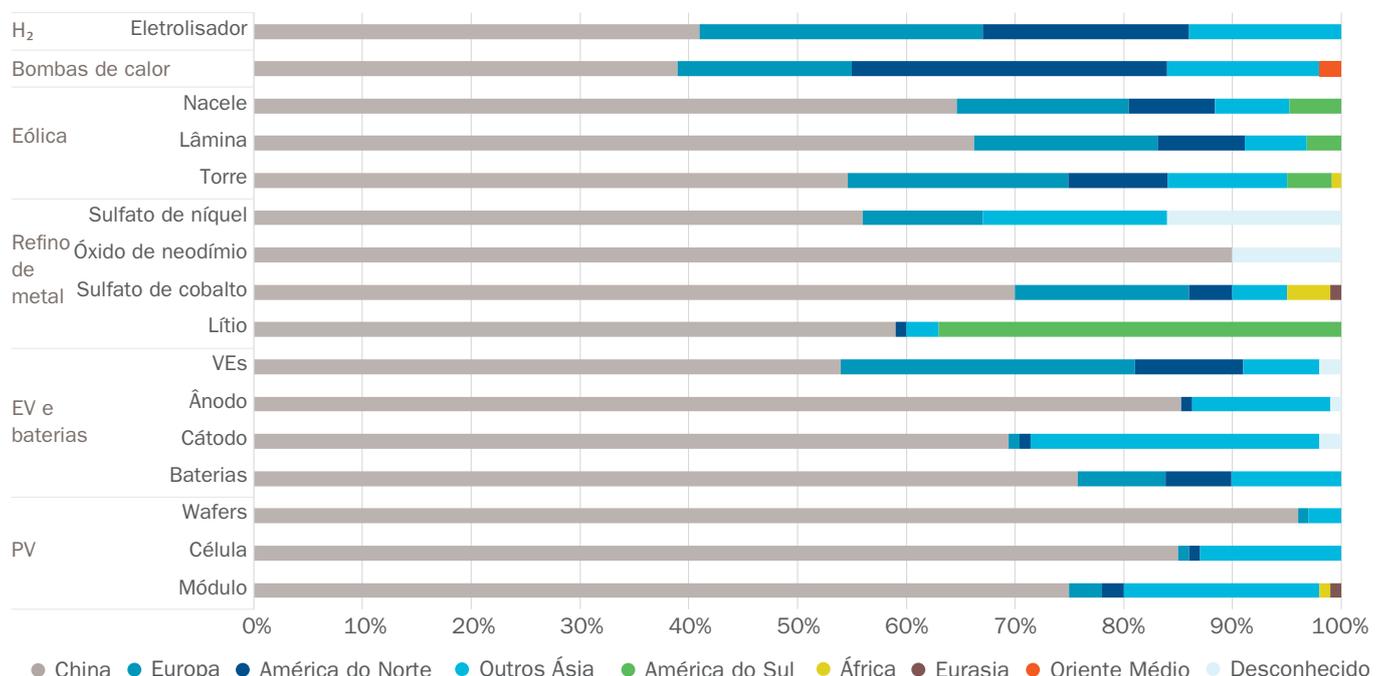
próximos anos. No entanto, para a refinação e processamento, a concentração geográfica deverá tornar-se ainda maior. De acordo com a AIE²³, é necessário abordar três níveis de desafios de suprimentos relacionados com materiais críticos para a transição energética:

- 1) Se a oferta futura conseguirá acompanhar o rápido ritmo de crescimento da demanda em cenários impulsionados pelo clima
- 2) Se esses suprimentos vêm de fontes diversificadas
- 3) Se esses volumes podem ser obtidos de forma sustentável.

Políticas como a Lei de Redução da Inflação (ver **Fact Box**) estão canalizando mais fundos para

tecnologias de energia limpa, com o duplo objetivo de reduzir as emissões e, ao mesmo tempo, apoiar as cadeias de suprimentos locais. Atualmente observamos uma maior vontade de apoiar tecnologias renováveis, por um lado, e um impulso no sentido de um maior protecionismo e barreiras comerciais, por outro lado. Por enquanto, os custos mais elevados são compensados pelo aumento dos subsídios e pela disponibilidade de fundos governamentais para apoiar a transição. Isto acelerou a transição energética; no entanto, esta abordagem poderá resultar numa transição mais dispendiosa. A investigação mostra que os custos de dissociação das cadeias de abastecimento globais, tanto a curto como a longo prazo, são elevados.²⁴

5 Capacidade de produção de energia limpa por local (%)²¹



FACT BOX

O papel da China na transição energética

A história do crescimento da China tem sido uma das tendências mais importantes que moldaram a economia global e a ordem política nas últimas décadas. Esta história também inclui a expansão massiva do setor energético, incluindo enormes investimentos feitos em energias renováveis. Em 2023, a Associação da Indústria Fotovoltaica da China previu que entre 120 a 140 GW de energia solar serão instalados na China. Isso supera o recorde de 87,4 GW instalados em 2022. Houve também um crescimento impressionante na energia eólica onshore e offshore, e a China foi responsável por 49% da adição global de energia renovável.²⁵ Além disso, foram vendidos 4,4 milhões de veículos elétricos a bateria no país.²⁶

Esta implantação foi possibilitada por cadeias de suprimentos renováveis nacionais. A China detém uma grande quota de mercado em quase todas as tecnologias renováveis, com total domínio em energia solar, baterias e refinação de minerais de terras raras.

A posição dominante da China torna quase impossível encontrar fornecedores alternativos. Mesmo quando se abastecem de outros países, incluindo o Vietnã, a Malásia ou os EUA, os fabricantes normalmente dependem de subcontratantes da China.²⁷

A crescente tensão entre a China e os EUA tem implicações significativas para as cadeias de suprimentos de energia renovável. A invasão da Ucrânia pela Rússia foi um lembrete de que o fornecimento de energia pode ser transformado em arma. Isto alimentou receios de que a China possa usar como arma o seu domínio nas energias renováveis para extrair concessões do Ocidente. Além disso, há questões sobre a sustentabilidade e as violações dos direitos humanos nas cadeias de abastecimento chinesas. Em 2023, houve uma repressão às empresas que realizam a devida diligência na China, tornando mais difícil certificar se os produtos foram fabricados de acordo com os padrões ESG (Ambiente, Social e Governança).²⁸

Em Julho de 2023, a China limitou a exportação dos minerais de terras raras - germânio e gálio, numa medida vista como retaliação à limitação dos EUA à exportação de semicondutores avançados para a China.²⁹ Esses minerais são usados na produção de semicondutores e para algumas tecnologias renováveis.

Com a crescente ênfase na segurança do abastecimento no setor energético e o aumento das tensões com a China, levando a apelos à redução de riscos, assistimos a uma mudança política tanto nos EUA como na UE. Com a “Lei de Redução da Inflação” dos EUA e o “Plano Industrial do Acordo Verde” da UE, as políticas verdes evoluíram da redução das emissões para agora também garantirem algum grau de controle interno sobre as cadeias de suprimentos.³⁰ Os empregos domésticos e o crescimento das economias locais têm sido utilizados como argumentos para uma transição verde. Agora a segurança de suprimentos foi acrescida como um fator importante.

Vemos tendências semelhantes em outras partes do mundo. A Índia tem o esquema de incentivo vinculado à produção (PLI) para apoiar a fabricação nacional de produção de energia solar fotovoltaica.³¹ Em outubro de 2022, o programa entrou na sua segunda fase, na qual foi ampliado de US\$ 600 milhões na primeira fase para US\$ 2,4 bilhões na segunda fase. Em 2021, a Índia também lançou um PLI para armazenamento de baterias de células químicas avançadas e alocou US\$ 2,2 bilhões para apoiar a fabricação nacional de baterias. Canadá, Coreia do Sul, Japão e Austrália são outros exemplos de países que concederam recentemente subsídios públicos para apoiar a produção nacional de tecnologia renovável. Em outubro de 2022, o programa entrou na sua segunda fase, ampliando de US\$ 600 milhões na primeira fase para US\$ 2,4 bilhões na segunda fase. Em 2021, a Índia também lançou um PLI para armazenamento de baterias de células químicas avançadas e alocou US\$ 2,2 bilhões para apoiar a fabricação nacional de baterias. Canadá, Coreia do Sul, Japão e Austrália são outros exemplos de países que concederam recentemente subsídios públicos para apoiar a produção nacional de tecnologia renovável.³²

A RESPOSTA DOS EUA

Lei de Redução da Inflação

A **Lei de Redução da Inflação (IRA)** é um conjunto de legislação que aborda diversas questões diferentes, incluindo redução do déficit, cuidados de saúde e clima. É a legislação climática mais abrangente já aprovada pelo Congresso dos EUA e irá direcionar mais de US\$ 369 bilhões em empréstimos e subvenções para programas climáticos e de segurança energética ao longo dos próximos dez anos.³³ Inclui apoio a uma vasta gama de tecnologias, incluindo a implantação de energias renováveis, energia nuclear, captura e armazenamento de carbono e hidrogênio limpo.³⁴ Com a aprovação do IRA, prevê-se que as emissões dos EUA diminuam 40% em relação a 2005, aproximando os EUA do seu objetivo de reduzir as emissões em 50% a 52% em relação aos níveis de 2005 até 2030.³⁵

O IRA é evidente devido à sua forte ênfase no apoio à produção e ao conteúdo local. Instalações e projetos elegíveis para apoio podem receber subsídios mais elevados se cumprirem os requisitos de conteúdo local.³⁶

A lei também inclui planos para permitir reformas. De acordo com o Berkeley Lab, havia cerca de 2.000 GW de capacidade renovável e armazenamento solicitando interconexão em 2022, incluindo 947 GW de capacidade de energia solar e 300 GW de energia eólica.³⁷ Garantir que haja transmissão construída para integrar novas capacidades é necessário para que o apoio no IRA tenha efeito. O mesmo se aplica ao licenciamento de novas energias renováveis.

RESPOSTA DA UE

Plano Industrial do Acordo Verde, Lei da Indústria Net Zero e Lei das Matérias-Primas Críticas

Em fevereiro de 2023, a Comissão Europeia apresentou o **Plano Industrial do Acordo Verde (GDIP)**.³⁸ Esta é uma resposta à mudança do contexto geopolítico e ao desejo político de aumentar a competitividade da Europa e reduzir as dependências da cadeia de suprimentos de países como a China. No âmbito dos seus quatro pilares – regulamentação, financiamento, competências e comércio – o plano estabelece objetivos políticos fundamentais para:

- garantir o fornecimento de tecnologias limpas e matérias-primas críticas
- intensificar os investimentos na inovação e na implantação de tecnologias verdes e criar mercados líderes através da implementação de regulamentos no mercado único
- utilizar os contratos públicos e a política de concorrência de uma forma mais estratégica
- criar novas parcerias internacionais e reforçar as existentes com países que a UE considera “parceiros amigos”.

Com a **Lei da Indústria Net Zero**, a Comissão procura estabelecer um ambiente regulamentar para dimensionar a capacidade de produção na UE para as tecnologias que são consideradas de “importância estratégica” para a União.³⁹ Isto é feito para atingir simultaneamente as suas metas climáticas e reduzir as

dependências da cadeia de suprimentos. Ao combinar medidas políticas como prazos de licenciamento mais curtos para locais de produção, sandbox regulatório¹ e um critério não relacionado com o preço que tem em consideração o país de origem dos componentes de energias renováveis em leilões, a Comissão pretende que a UE satisfaça mais das suas necessidades de implantação através de capacidade de produção nacional.

A **Lei das Matérias-Primas Críticas** tenta aumentar a resiliência das cadeias de suprimentos de matérias-primas críticas, principalmente aumentando a capacidade da UE para extrair, processar e reciclar estes materiais.⁴⁰ A proposta estabelece metas nacionais a serem cumpridas até 2030 e identifica uma lista de matérias-primas essenciais necessárias para fabricar as tecnologias necessárias para as transições digital e verde. A Lei reconhece que as medidas internas não tornarão a UE totalmente autossuficiente em matérias-primas críticas, razão pela qual a Comissão se envolveu numa estratégia para diversificar as suas importações. A UE está atualmente em conversações com os Estados Unidos sobre um clube de matérias-primas críticas para países com ideias semelhantes.

¹ Um sandbox regulatório é uma ferramenta que permite às empresas explorar e experimentar produtos, serviços ou negócios novos e inovadores sob a supervisão de um regulador.



A maior tensão geopolítica e as interdependências colocam maior ênfase na produção local e no controle das cadeias de abastecimento

Fragmentação global e nacional

Estamos num período de grandes mudanças geopolíticas, demográficas, econômicas e tecnológicas. Em 1995, a UE, os EUA e o Japão representavam 70% do PIB global. Em 2021, esta percentagem era de 49%, enquanto a percentagem da China cresceu para 16% do PIB global a preços correntes.⁴¹ Esta mudança tem um impacto profundo na transição energética.

O período desde a assinatura da Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas em 1992 até hoje tem sido caracterizado pela globalização, elevado crescimento global e baixa inflação. Agora estamos entrando num período em que, segundo o Banco Mundial, quase todas as forças que impulsionaram o crescimento e a prosperidade desde o início da década de 1990 enfraqueceram.⁴² Já vemos que o aumento da tensão geopolítica é um desafio para a coordenação da ação climática global e aumenta a ênfase na segurança de suprimentos e na resiliência da cadeia de valor.

A nível nacional, assistimos também a uma maior fragmentação. Em toda a Europa, os populistas – especialmente os de direita – aumentaram a sua força eleitoral nas últimas eleições, de acordo com o Pew Research Center.⁴³ Na Itália e na Hungria, os partidos populistas de direita são atualmente o governo controlador, e a Suécia, França, Países Baixos, entre outros, registraram um aumento no apoio populista ao longo da última década. Apesar de ser um dos poucos países que, até certo ponto, contrariou esta tendência nas últimas eleições, o partido alemão “Alternativa para a Alemanha” (AfD) também cresceu em popularidade nas sondagens recentes, com a oposição ao governo e à política climática da UE como principal impulsionador – que destaca os riscos que isso acarreta para uma transição energética estruturada na UE.⁴⁴

Qualquer transição encontrará oposição, mas se o esforço para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa afetar nações, grupos vulneráveis ou indivíduos de uma forma injusta, perderá o apoio e a tração necessários. Várias ações de mitigação e adaptação às alterações climáticas têm múltiplas sinergias com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e com o desenvolvimento sustentável em geral, mas algumas ações também podem significar compensações tanto para a natureza como para as pessoas. Não existem soluções rápidas para estes compromissos, mas podem ser minimizados através da participação significativa das comunidades locais, dos povos indígenas e das populações vulneráveis. Alcançar uma participação significativa entre os grupos e regiões que podem perder a transição é fundamental para garantir a coesão social necessária para uma transição rápida e profunda.

Esta evolução salienta a necessidade de manter baixos os custos da transição energética, tanto para proteger os consumidores vulneráveis como para garantir o apoio político à ação. Segundo o Fundo Monetário Internacional (FMI), muitos países avançarão para a consolidação orçamentária, reduzindo o espaço para criar políticas climáticas, como subsídios.⁴⁵ Os subsídios colocam pressão sobre as finanças públicas e afetam a capacidade de compensar aqueles que perdem com a transição energética. Soluções como a tarifação do carbono podem proporcionar uma transição econômica e, ao mesmo tempo, fortalecer as finanças públicas, mas correm o risco de atingir desproporcionalmente as famílias vulneráveis. Para garantir uma transição energética suficientemente rápida e eficiente, mantendo simultaneamente a dívida soberana em níveis sustentáveis e mantendo o apoio político, é necessária uma vasta gama de instrumentos de políticas.

Novos objetivos de política com impactos incertos

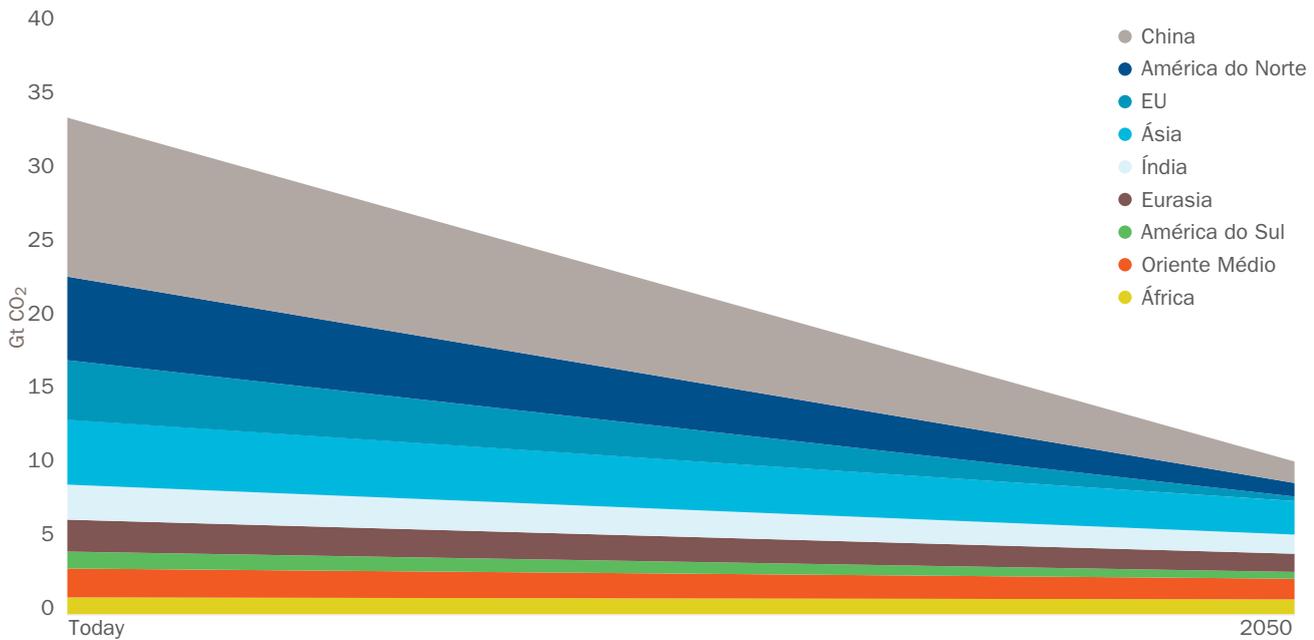
A maior tensão geopolítica e as interdependências colocam maior ênfase na produção local e no controle das cadeias de abastecimento. Até agora, estas prioridades levaram a um maior apoio econômico às energias renováveis e à produção de tecnologias renováveis, tanto nos EUA como na UE.⁴⁶

Ainda é muito cedo para avaliar o efeito a longo prazo de políticas orientadas por subsídios e mais protecionistas, como o IRA e a Lei da Indústria Net Zero. Até agora, a ênfase tem sido colocada no desenvolvimento de cadeias de abastecimento mais resilientes, mas isso não levou a uma dissociação das cadeias de abastecimento globais.

Ainda assim, as tarifas e uma menor cooperação global poderão levar a custos mais elevados para as tecnologias renováveis e a uma transferência de tecnologia mais lenta.

Também é importante a forma como as metas de maior conteúdo local são alcançadas. O investimento na investigação e no apoio à capacidade de produção adicional pode estimular a inovação que conduz a preços mais baixos e a mais bens públicos globais, acelerando assim a transição verde a longo prazo. No entanto, menos comércio e colaboração globais poderiam restringir o acesso do mundo em desenvolvimento a esta inovação, aumentando assim os custos e retardando a transição energética.

6 Emissões globais de CO₂ relacionadas à energia (GtCO₂) por região 6, de hoje até 2050 no Low Emissions Scenario



Low Emissions Scenario

Medidas urgentes são necessárias para enfrentar a crise climática e, ao mesmo tempo, garantir a sustentabilidade no contexto mais amplo

Em 2023, foi divulgado o relatório de síntese para o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6). O relatório reitera que as atividades humanas causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global a atingir 1,1 grau acima dos níveis de 1850-1900 em 2011-2020. Com o AR6, podemos, com um grau de certeza ainda maior, atribuir a atividade humana às alterações climáticas, e as potenciais consequências do aquecimento global são melhor compreendidas. Para limitar o aquecimento global a 1,5 graus sem grandes ultrapassagens, as emissões globais devem ser reduzidas para metade até 2030 e o valor net zero deve ser alcançado em meados do século. De acordo com o IPCC, a implantação de energia eólica e solar são as duas opções de mitigação com maior potencial e menores custos.⁴⁷

Como as temperaturas globais já aumentaram e continuarão a aumentar até que as emissões globais cheguem a zero, o IPCC sublinha a importância da adaptação às alterações climáticas. Na Noruega, durante o evento climático extremo, Hans, a capacidade da energia hidrelétrica para mitigar as inundações revelou-se crucial na redução do que teria sido um evento de 1.000 anos para uma inundação de 100 anos, em algumas regiões.⁴⁸ Segundo a Organização Meteorológica Mundial,

os extremos que vivemos em 2023 são a nova norma, realçando a necessidade de adaptação.⁴⁹

Embora a transição energética esteja acelerando na Europa, nos EUA e na China, outras partes do mundo ainda estão atrasadas. Os países em desenvolvimento fora da China representam a maioria da população mundial e a maior parte do crescimento da demanda global de energia, mas, ao mesmo tempo, menos de 20% do investimento global em energia limpa.⁵⁰ A nossa análise conclui que, para manter o aquecimento global bem abaixo dos 2 graus, é fundamental que os países em desenvolvimento também aumentem os investimentos em energias renováveis – especialmente porque estes países são os principais motores do crescimento econômico e da demanda de energia. Os investimentos atuais em soluções baseadas em combustíveis fósseis correm o risco de bloquear as emissões a longo prazo. No Low Emissions Scenario, o mundo em desenvolvimento é responsável por uma parcela substancialmente maior do total de emissões globais em 2050 (Figura 6).

O financiamento adequado é vital para acelerar a implantação de tecnologias de energia limpa. Na COP 27 em Sharm-El Sheik, o financiamento climático estava no

De acordo com o IPCC, a implantação da energia eólica e energia solar são as duas opções de mitigação com maior potencial e menores custos.



Location: Alcalá de Guadaíra, Seville, Spain

topo da agenda, uma vez que os países desenvolvidos foram responsabilizados por não cumprirem os US\$ 100 bilhões prometidos.⁵¹ Na COP deste ano em Dubai, o financiamento será novamente uma parte importante da discussão. Esta COP será o primeiro “Global Stocktake” e fornecerá uma avaliação abrangente do progresso desde a adoção do Acordo de Paris. Garantir que os países em desenvolvimento, especialmente os menos desenvolvidos, sejam capazes de participar na transição energética é importante para garantir o desenvolvimento global e cumprir as metas do Acordo de Paris.

Além da crise climática, o mundo enfrenta desafios ecológicos adicionais, incluindo a perda de ecossistemas e de biodiversidade, bem como a poluição.⁵² Em 2022, a 15ª COP da Convenção das Nações Unidas sobre Diversidade Biológica marcou a adoção do Quadro Global de Biodiversidade Kunming-Montreal.⁵³ Isto estabelece metas a serem alcançadas até 2030, incluindo 30% de conservação

da terra e do mar, 30% de restauração de ecossistemas degradados, redução para metade da introdução de espécies invasoras e redução de US\$ 500 bilhões/ano em subsídios prejudiciais. Além disso, os objetivos globais a serem alcançados até 2050 incluem travar a extinção de espécies induzida pelo homem e a utilização insustentável de biomassa. Uma maior ênfase na conservação da natureza e na proteção da biodiversidade terá consequências na resposta à crise climática. A conservação da natureza terá um efeito positivo nas emissões provenientes do uso do solo, mas ao mesmo tempo poderá limitar a área disponível para o desenvolvimento renovável.

ⁱ O global stocktake é um processo para os países e as partes interessadas verem onde estão coletivamente a fazer progressos no sentido de cumprir os objetivos do Acordo de Paris sobre Alterações Climáticas – e onde não estão. O stocktake ocorre a cada cinco anos, estando o primeiro programado para ser concluído na Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (COP28). Conecta a implementação de contribuições determinadas a nível nacional (NDCs) aos objetivos globais do Acordo de Paris e tem como objetivo aumentar as ambições.

Mercados, tecnologia, e reforço de política necessários

Como mostraremos neste Low Emissions Scenario, o desenvolvimento de energias sustentáveis e renováveis, combinado à eficiência energética e a eletrificação dos setores de utilização final, são os principais pilares necessários para navegar na transição energética. A crise climática exige medidas urgentes e o tempo é um recurso limitante importante. Nas últimas décadas, os subsídios públicos às energias renováveis levaram à queda dos custos. Várias tecnologias renováveis, incluindo a energia eólica onshore, a energia solar fotovoltaica e as bombas de calor, são agora competitivas em termos de custos com as alternativas fósseis e os veículos elétricos a bateria estão próximos da paridade de custos. Isto cria uma forte dinâmica em que a política e os mercados trabalham em conjunto para permitir uma transição rápida. Ao mesmo tempo, a velocidade deve acelerar para atingir 1,5 graus e, para os setores mais difíceis de reduzir, a necessidade de apoio público ainda é significativa.

A Statkraft é há muito tempo uma forte defensora da precificação do carbono como um instrumento central de política climática.

As receitas governamentais criadas a partir deste mercado também podem ser utilizadas para garantir uma transição justa. Estudos empíricos recentes mostram que os danos da fixação do preço do carbono no crescimento econômico são atenuados e que o custo macroeconômico de uma transição eficiente é relativamente baixo, enquanto uma transição em atraso e desordenada é mais cara.⁵⁴ A fixação de preços do carbono é fundamental para facilitar uma transição rápida e eficiente em termos de custos. Isto deve ser combinado com subsídios e regulamentação para apoiar a inovação e a expansão de novas tecnologias.

O mundo enfrenta uma incerteza crescente e maior grau de tensão do que há alguns anos. No entanto, o Low Emissions Scenario mostra que mesmo num cenário que pressupõe mais conflitos e protecionismo, a transição energética continua a um ritmo relativamente elevado. Com o reforço adicional das políticas e do financiamento para as tecnologias renováveis nas economias em desenvolvimento, a transição energética poderá acelerar e aproximar-nos de 1,5 graus.



Nas últimas décadas, os subsídios públicos às energias renováveis levaram à queda dos custos

Várias tecnologias renováveis, incluindo a energia eólica em terra eólica, solar fotovoltaica e bombas de calor, são atualmente competitivas com as alternativas fósseis e os veículos elétricos a bateria e os veículos elétricos a bateria estão próximos da paridade de custos.



A transição energética em um mundo fragmentado

Low Emissions Scenario



Local: Parque eólico de Baillie, Escócia

7 A velocidade da transição energética e o grau de tensão geopolítica nos diferentes cenários até 2050



À medida que aumenta a incerteza geopolítica, enfrentamos escolhas que poderão ter um impacto significativo na mudança mundial para uma energia mais limpa. Nas próximas décadas, os sistemas energéticos deverão desenvolver-se para cumprir as metas climáticas, garantindo simultaneamente a segurança energética. Precisam seguir um caminho de transição que utilize eficazmente os recursos energéticos e financeiros, protegendo ao mesmo tempo os consumidores e as famílias vulneráveis.

No Low Emissions Scenario, os mercados, as políticas e a tecnologia trabalham juntos, oferecendo um caminho para uma descarbonização substancial de uma forma rentável. No entanto, também exploramos cenários alternativos na Disputa Clean Tech e no Atraso na Transição. Estes cenários demonstram como as decisões sobre questões globais e nacionais podem influenciar a transição energética a longo prazo.

O Low Emissions Scenario da Statkraft baseia-se em mercados globais e cadeias de suprimentos que funcionam bem, políticas climáticas proativas e eficientes e colaboração internacional, que impulsionam avanços e reduções de custos em tecnologias limpas. No entanto, tal como descrito no Capítulo 1, o aumento da tensão geopolítica e a atenção à segurança energética e aos preços acessíveis da energia podem afetar fortemente a transição adiante.

Em resposta a esta incerteza crescente, introduzimos dois cenários adicionais no relatório deste ano. O primeiro é a “Clean Tech rumo ao Net Zero”, um cenário em que as superpotências globais se envolvem numa competição impulsionada por subsídios pelo domínio nas indústrias e cadeias de suprimentos de energia limpa. A segunda é o “Atraso na Transição”, que prevê uma trajetória em que desafios prementes de curto prazo, como o aumento do custo de vida, a agitação social e a segurança de suprimentos, estejam no topo da agenda política.

Esses cenários servem como janelas para futuros potenciais, oferecendo insights sobre os possíveis resultados de nossas decisões, políticas e ações.

Enquanto os novos cenários exploram os desafios e consequências de caminhos alternativos, o nosso cenário principal é o “Low Emissions Scenario”. Este continua a ser o nosso cenário realista mas otimista, que mostra como os nossos esforços coletivos podem levar a um mundo onde as emissões sejam significativamente reduzidas a um custo baixo e a um ritmo relativamente elevado. Neste cenário, os avanços tecnológicos, a dinâmica do mercado e as políticas proativas alinham-se para impulsionar a transição para a energia limpa.

Olhar para a transição energética a partir de três perspectivas diferentes fornece uma visão sobre a complexa interação de forças geopolíticas, decisões políticas, avanços tecnológicos, prioridades sociais, juntamente com o desenvolvimento econômico. Dentro dos cenários encontram-se consequências críticas para a transição energética, em áreas como a adoção de energias renováveis, a eficiência energética, as escolhas tecnológicas, a eletrificação e a descarbonização de vários setores.

Cenários da Statkraft

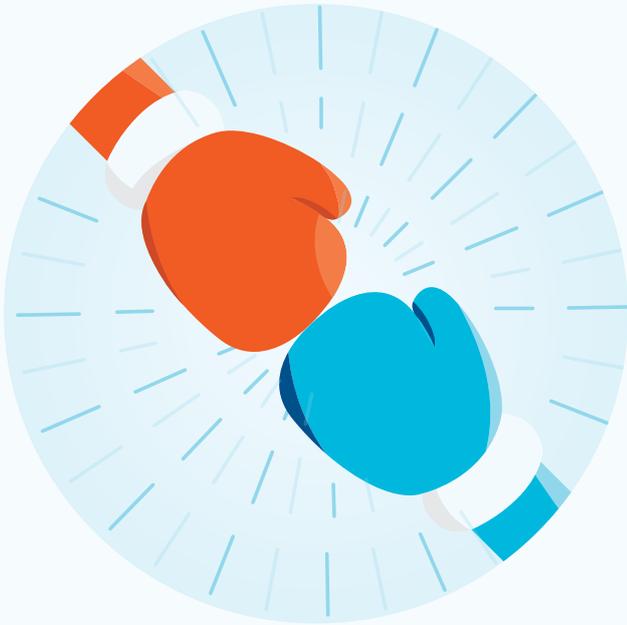
Nossos cenários detalham três
perspectivas diferentes para o
futuro energético até 2050



1. Low Emissions Scenario

O **Low Emissions Scenario** é um cenário otimista, mas realista, em que a tecnologia, a dinâmica do mercado e as políticas proativas aceleram harmoniosamente a transição energética. Combinado com a colaboração global, isto ajuda a facilitar uma transição eficiente para fontes de energia mais limpas, garantindo que as emissões sejam reduzidas a um custo razoável, apoiadas por mercados de carbono em expansão global. O bom funcionamento dos mercados globais e das cadeias de abastecimento permite um crescimento econômico robusto, enquanto os avanços tecnológicos impulsionados pelo mercado também ajudam a impulsionar a transição para as energias limpas.

As relações China-UE/EUA são definidas por regras acordadas e por uma maior estabilidade geopolítica, e uma economia mundial estável cria um ambiente propício para um progresso rápido. Este cenário prevê uma aceleração da transição energética também nos países em desenvolvimento, impulsionada tanto pela pressão internacional como pela diminuição dos custos das tecnologias de energia limpa.



2. Disputa na Transição rumo ao Net Zero



3. Atraso na Transição

Na **Disputa Clean Tech Rumo ao Net Zero**, as superpotências mundiais envolvem-se numa intensa corrida pelo domínio global nas indústrias de energia limpa e para alcançar emissões net zero – uma reminiscência da “Corrida Espacial” entre a União Soviética e os EUA durante a Guerra Fria. A energia limpa é vista como crucial tanto para a segurança energética como para a redução de emissões. A China, os EUA e a UE envolvem-se numa competição alimentada por subsídios para desenvolver indústrias limpas e estabelecer o controle regional sobre as cadeias de abastecimento de tecnologias renováveis. Uma maior ênfase na proteção das cadeias de abastecimento locais reduzirá o comércio global de tecnologias renováveis, resultando numa transição energética mais dispendiosa e desafiadora.

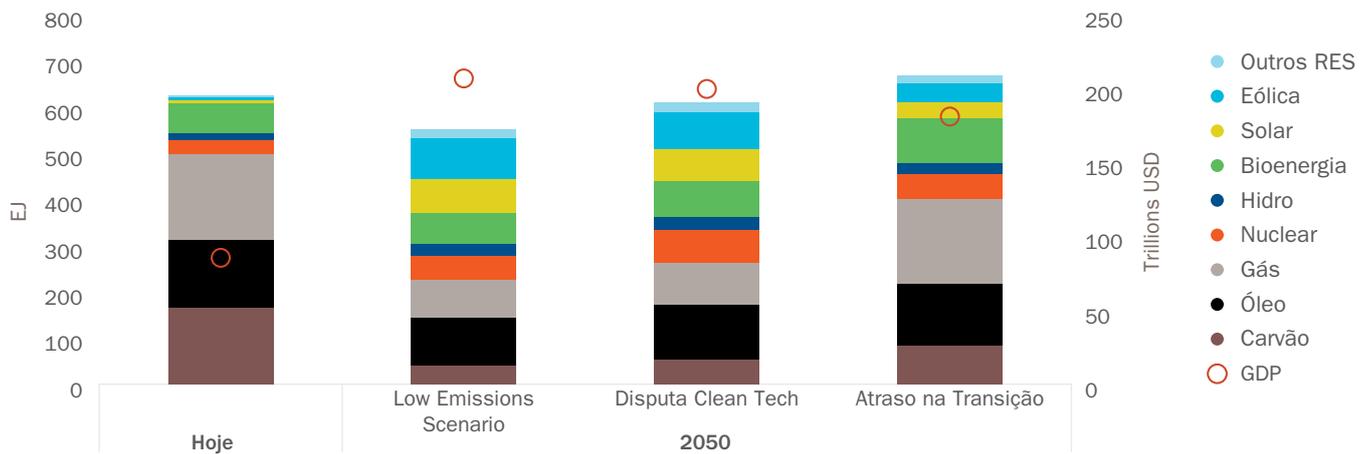
Apesar do impulso para a energia limpa, as metas de redução de emissões a curto prazo enfrentam atrasos devido ao aumento dos custos e às complexidades da reestruturação das economias, indústrias e cadeias de suprimentos. A corrida aos subsídios aumenta o receio da fuga de carbono dos preços do carbono e, em todos os mercados, outros instrumentos de política são preferidos. Uma transição orientada por subsídios leva a uma transição mais imprevisível, onde as políticas de Escolha dos Vencedores lideradas pelo Estado podem levar a escolhas tecnológicas ineficientes e mais dispendiosas. Além disso, uma transição baseada nas despesas coloca uma pressão significativa nas finanças públicas. O custo mais elevado das tecnologias renováveis, juntamente com o investimento limitado e o acesso ao capital nos países em desenvolvimento, aumenta a lacuna entre os países desenvolvidos e os países em desenvolvimento.

Neste cenário, a ação climática urgente fica em segundo plano face a um turbilhão de desafios globais. À medida que as tensões geopolíticas aumentam, as preocupações com a segurança energética e as perturbações na cadeia de abastecimento ofuscam as prioridades ambientais. A escalada da inflação e o aumento dos custos de vida desviam recursos dos investimentos em energia limpa. Os investimentos em energias renováveis são impulsionados pelo baixo custo, mas a falta de orientação política torna mais difícil a redução das emissões no setor de utilização final, especialmente os setores difíceis de reduzir, e para remoção de emissões residuais dispendiosas no setor da energia.

As tecnologias de combustíveis fósseis com custos iniciais mais baixos surgem como uma solução de curto prazo para a crise energética. O aumento do conflito e da tensão geopolítica tornam a energia nuclear não só importante para a segurança energética, mas também estratégica por razões de segurança nacional. A agitação social e a instabilidade política criam uma atmosfera de incerteza, levando a um abrandamento do crescimento económico global. As políticas protecionistas e a nacionalização das indústrias tornam-se mecanismos de resposta para os países que enfrentam padrões de vida reduzidos. Na Europa, as mudanças políticas em direção a ideologias de extrema-direita ou de extrema-esquerda dificultam a cooperação regional em soluções, amplificando a falta de ação coletiva. Os mercados emergentes, atingidos pela recessão económica global, lutam para acompanhar os esforços de transição energética.

A transformação de combustíveis fósseis, incluindo carvão, petróleo e gás, em energia útil envolve combustão, o que leva a grandes perdas de energia na forma de calor.





O uso de energia primária diminui até 2050 no Low Emissions Scenario

Apesar do crescimento significativo da economia e da população globais, a nossa análise indica uma diminuição na demanda de energia primária até 2050, como resultado da eletrificação e de outras medidas de eficiência energética. Prevê-se que o mix energético mude consideravelmente, com um aumento das energias renováveis e uma diminuição das emissões. No entanto, isso varia entre os cenários. Cenários com menor eficiência energética e crescimento mais intensivo em energia resultam em maior consumo de energia primária.

A demanda de energia primária é a energia total necessária, incluindo as perdas de transformação e distribuição ao converter petróleo, gás fóssil ou energias renováveis em eletricidade, produtos petrolíferos ou outras formas de energia úteis que podem ser utilizadas nos setores de utilização final.

A transformação de combustíveis fósseis, incluindo carvão, petróleo e gás, em energia útil envolve combustão, o que leva a elevadas perdas de energia na forma de calor. Em contrapartida, a produção de energia renovável é gerada diretamente a partir de fontes renováveis variáveis e ilimitadas e, portanto, requer menos etapas de conversão e atinge maior eficiência.

O desenvolvimento da energia primária no Low Emission Scenario segue um caminho transformador, ancorado em três pilares: eletrificação, eficiência energética e crescimento menos intensivo em energia.

Eletrificação: O cenário enfatiza o uso direto de eletricidade, reduzindo a demanda de energia através da substituição de combustíveis fósseis por energias

renováveis eficientes em setores como edifícios, transportes e indústrias.

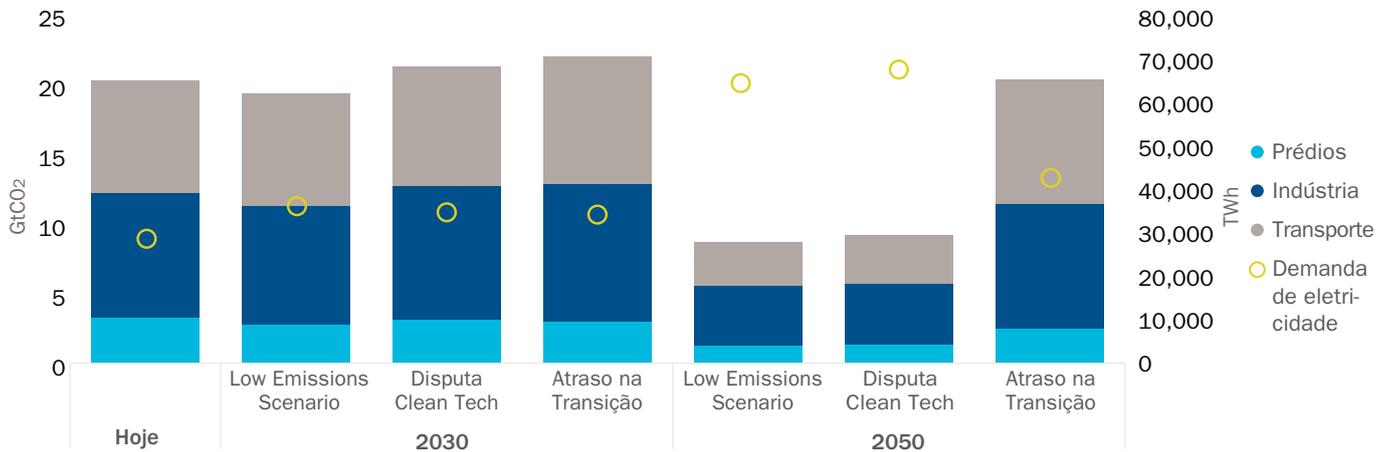
Eficiência Energética: Os avanços na tecnologia, o uso mais eficiente de materiais, a reciclagem e o comportamento impulsionam práticas de eficiência energética, reduzindo o desperdício e diminuindo a demanda geral de energia em todos os setores.

Crescimento menos intensivo em energia: A expansão econômica desloca-se para setores com menor demanda de energia, alinhando o crescimento com a redução da demanda de energia primária.

Estes pilares sinergizam para remodelar o desenvolvimento da energia primária, promovendo a sustentabilidade no meio do progresso econômico. Este desenvolvimento resulta na diminuição da demanda de energia primária até 2050, mesmo com o crescimento econômico e o aumento da população a nível mundial.

No cenário de Disputa Clean Tech e Atraso na Transição, o progresso nestas três frentes diverge do Low Emissions Scenario.

9 Emissões globais de CO₂ relacionadas com a energia por sector 9 (GtCO₂) e procura total de energia (TWh)



A eletrificação é a principal solução climática

A eficiência energética, a eletricidade, o hidrogênio limpo e a bioenergia são fundamentais para reduzir as emissões e a dependência dos combustíveis fósseis nos setores de utilização final. A utilização direta da eletricidade, aliada à eficiência energética, é considerada a abordagem mais rentável sempre que possível. No entanto, a extensão e a velocidade destas mudanças variam em diferentes cenários. No cenário de rivalidade com tecnologias limpas, as limitações de curto prazo da cadeia de abastecimento e uma transição menos eficiente e mais dispendiosa resultam em emissões mais elevadas e num aumento da procura. No cenário de Atraso na Transição, políticas climáticas menos ambiciosas e um progresso tecnológico mais lento levam a reduções limitadas de emissões nos setores de utilização final.

Atualmente, os combustíveis fósseis desempenham um papel dominante na cobertura da demanda dos setores de utilização final. No setor de edificações, a energia derivada de combustíveis fósseis, principalmente o gás natural, é amplamente utilizada para aquecer espaços, fornecer água quente e abastecer aparelhos de cozinha. Da mesma forma, o setor industrial depende do carvão e do gás natural para aquecimento de processos, funcionamento de máquinas e outras operações de produção. Esses combustíveis fósseis contribuem significativamente para a natureza intensiva de energia dos processos industriais.

O setor dos transportes depende fortemente de combustíveis fósseis líquidos (principalmente derivados do petróleo) para alimentar todos os meios de transporte. No entanto, os motores convencionais de combustão interna são relativamente ineficientes e contribuem para as emissões globais de CO₂ e para a poluição local.

A utilização direta de eletricidade combinada com a eficiência energética é considerada a forma mais rentável de reduzir as emissões, sempre que viável. Com os avanços tecnológicos e a redução dos custos, a eletrificação ganhará impulso nos setores dos transportes e da construção, à medida que os veículos tradicionais com motor de combustão são substituídos por veículos elétricos e as caldeiras alimentadas a combustíveis fósseis são substituídas por bombas de calor. As fontes de energia renováveis estão cada vez mais integradas nos setores de utilização final através da utilização direta de eletricidade e hidrogênio verde,

oferecendo alternativas mais limpas à energia baseada em combustíveis fósseis. A união destes setores também pode proporcionar a tão necessária flexibilidade do lado da demanda ao sistema energético. Além da bioenergia sustentável, o hidrogênio será um importante vetor de energia para reduzir as emissões em setores difíceis de reduzir, como o elevado aquecimento industrial e os transportes de longo curso, onde a eletrificação é menos viável. O hidrogênio é, no entanto, muito menos eficiente do que a utilização direta de eletricidade, e tanto a produção como o consumo de hidrogênio baseiam-se em tecnologias menos maduras e que exigem mais impulso político e desenvolvimento tecnológico.

A mudança da eletricidade fóssil para a renovável é essencial para mitigar o impacto ambiental associado à utilização de combustíveis fósseis, abrindo caminho para um futuro energético mais sustentável. A eletricidade é um vetor energético eficiente. Proporciona flexibilidade ao sistema elétrico, melhora a qualidade do ar e reduz as emissões quando é produzida a partir de fontes renováveis.

No the Low Emissions Scenario, as emissões globais de CO₂ relacionadas com a energia serão reduzidas em cerca de 50% até 2050 (em relação aos níveis de 1990), à medida que as tendências que vemos hoje continuam e aceleram. Com foco na eficiência energética, no aumento da eletrificação e nos investimentos em hidrogênio limpo e bioenergia, o mundo reduz as emissões e a sua dependência de combustíveis fósseis nos setores de utilização final.

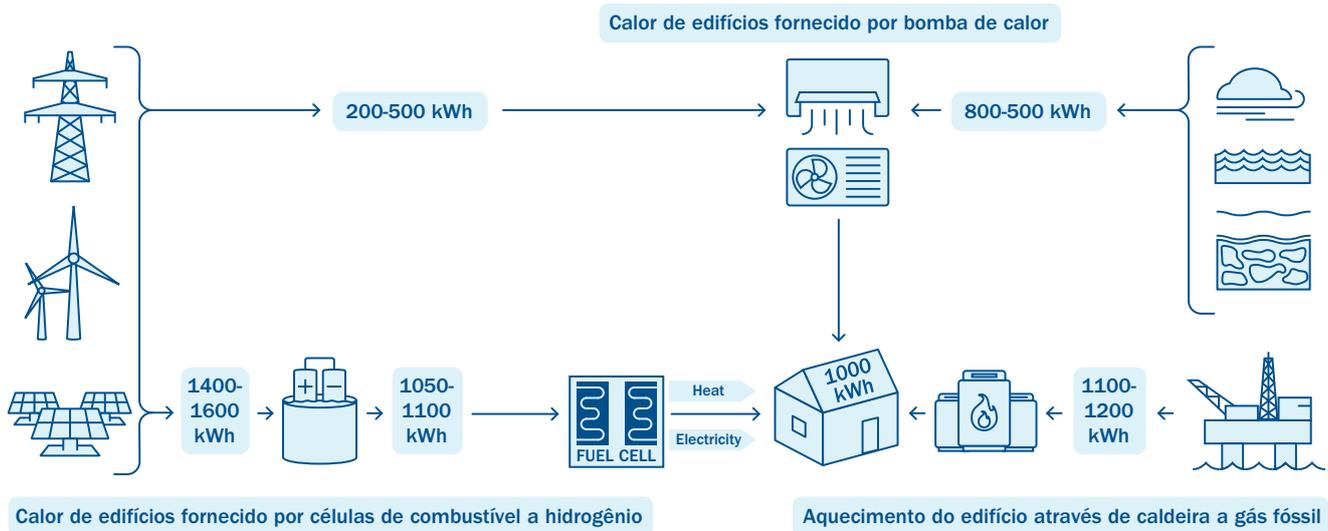
No setor dos edifícios, a energia derivada de combustíveis fósseis, principalmente o gás natural, é amplamente utilizada para aquecer espaços, fornecer água quente e abastecer aparelhos de cozinha.



Na Disputa Clean Tech, as emissões globais serão reduzidas em cerca de 40% até 2050 (em comparação com os níveis de 1990). Cadeias de suprimentos mais dispendiosas, instrumentos políticos ineficientes e investimento insuficiente nos países em desenvolvimento levam a uma descarbonização mais lenta do setor de utilização final até 2030 – bloqueando as emissões e aumentando a demanda de energia a longo prazo. No entanto, à medida que os gargalos na cadeia de suprimentos diminuem, a eletrificação e a implantação do hidrogênio aceleram em direção a 2050 e a implantação de energias renováveis é 13% superior ao Low Emissions Scenario entre 2040 e 2050.

No Atraso na Transição, as emissões globais serão aproximadamente 25% mais elevadas em 2050 (em comparação com os níveis de 1990). A falta de impulso político, combinada com um baixo preço do carbono, leva a uma descarbonização substancialmente mais lenta dos setores de utilização final. Uma menor implantação retarda o desenvolvimento tecnológico e atrasa as reduções de custos, tornando as tecnologias limpas menos competitivas. Isto atrasa as reduções de emissões devido a investimentos em tecnologias de combustíveis fósseis com vida útil de 20 a 40 anos. A transição dos setores de utilização final é muito mais lenta do que no Low Emissions Scenario e nunca se alcança (Figura 9).

10 Ilustração da energia necessária para fornecer 1000 kWh de calor baseado em hidrogênio, bombas de calor e caldeiras a gás fóssil



Descarbonização do setor de edificações com bombas de calor e eficiência energética

Atualmente, o setor dos edifícios contribui para 30% do consumo global de energia e para quase 10% das emissões de carbono relacionadas com a energia, mas esta percentagem duplica se forem incluídas as emissões indiretas da produção de eletricidade e de calor.⁵⁵ O uso de energia nos edifícios é atribuído principalmente ao aquecimento. Em muitas regiões, o gás natural é comumente utilizado para aquecimento e em países subdesenvolvidos, a biomassa tradicional é normalmente utilizada, evidenciando a importância do acesso a energia segura, limpa e sustentável.

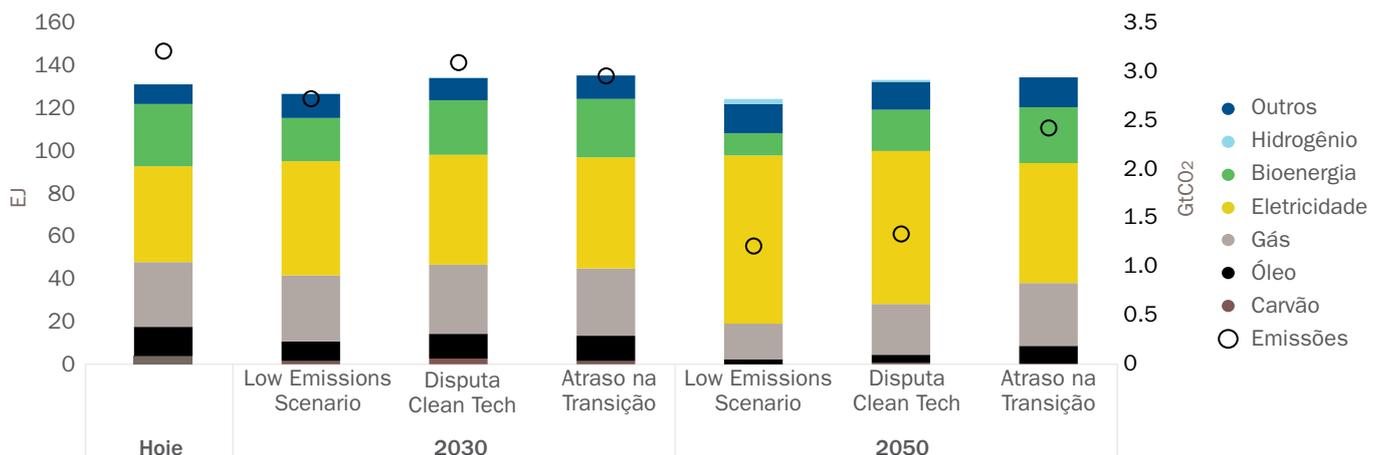
Devido à crescente ênfase na eficiência energética, o consumo de energia no setor dos edifícios permanece nos níveis atuais até 2050 no **Low Emissions Scenario**, apesar do crescimento econômico robusto, do crescimento populacional e do aumento da urbanização no mundo em desenvolvimento. No entanto, o consumo de eletricidade do setor de edificações quase duplica durante este período, uma vez que a eletricidade substitui em grande parte o carvão, o gás, o petróleo e a biomassa tradicional. Esta mudança contribui para uma redução de 63% nas emissões de CO₂ dos níveis actuais até 2050, e a cota de eletricidade na demanda final de energia aumenta de 34% para 63%.

Nos cenários de Disputa Clean Tech e Atraso na Transição, faltam o enfoque político e o investimento necessários na eficiência energética, o que leva ao aumento do consumo de energia. Para a Disputa Clean Tech, os recursos nos países desenvolvidos são alocados principalmente para o fornecimento de energia limpa, indústrias e desenvolvimentos da cadeia de suprimentos, deixando menos financiamento

para melhorias de eficiência energética em edifícios. Os elevados custos iniciais da eficiência energética levam a uma maior demanda de energia em ambos os cenários. A falta de investimentos e de um quadro político robusto para a eficiência energética em edifícios novos e existentes torna ainda mais difícil para os países em desenvolvimento reduzirem as emissões (e a demanda de energia) no setor de edificações, especialmente à medida que as populações dos países em desenvolvimento crescem e se urbanizam em conjunto com crescimento da economia. Haverá um rápido aumento na necessidade de espaço físico nestes países, o que destaca o papel crucial de quadros políticos robustos para orientar a transição energética de forma sustentável.

Isto resulta numa demanda elevada de energia por parte dos edifícios até 2030, e a Disputa Clean Tech e o Atraso na Transição ultrapassam o Low Emissions Scenario em cerca de 6% e 7%, respectivamente, em termos de demanda no setor de edificações. Embora a eletrificação e a eficiência energética ganhem impulso em 2050 na Disputa Clean Tech, o cenário de Atraso na Transição não consegue transpor a lacuna. Além disso, a proporção do consumo de eletricidade é notavelmente menor na Transição Atrasada, contribuindo para o aumento das emissões.

Subsetor	Principais Soluções		
Prédios	Eletrificação	Bombas de calor e uso direto de eletricidade	A forma mais econômica de abandonar os sistemas de aquecimento baseados em combustíveis fósseis é através da eletricidade direta. As medidas de eficiência energética têm uma vasta gama de custos, mas são muito necessárias para reduzir as emissões nos edifícios.
	Eficiência energética		As bombas de calor têm um custo de eficiência energética relativamente baixo e são fáceis de implementar em habitações. Elas são muito eficientes devido à sua capacidade de extrair calor do ar, da água ou do solo, fornecendo, em última análise, mais calor do que através da eletricidade direta, e quando combinadas com fontes de energia renováveis, podem reduzir significativamente as pegadas de carbono. Os modelos atuais são 3 a 5 vezes mais eficientes do que as caldeiras a gás. (Figura 10)
		Edifícios com conceito design passivo	Nas novas construções, é possível incorporar um design passivo, como orientação estratégica do edifício, ventilação natural e maximização da luz natural para minimizar a necessidade de refrigeração e iluminação artificiais
		Aparelhos eficientes	Aparelhos eficientes, iluminação LED e termostatos inteligentes também desempenham um papel crucial na redução do consumo de energia.
		Modernização dos prédios existentes	A modernização de edifícios existentes e a redução da energia para aquecimento através de um melhor isolamento de paredes e janelas podem reduzir significativamente o consumo de energia, mas normalmente são mais dispendiosas, com custos iniciais mais elevados e necessidade de mais planejamento.
	Mudanças comportamentais		Criar hábitos melhores, como desligar as luzes e alterar a temperatura de conforto interna aceita, bem como ajustar os termostatos, pode, coletivamente, ter um impacto significativo.
	Integração de Energia Renovável	Rooftop solar	A instalação de painéis solares nos telhados e a utilização de energia solar para a geração de eletricidade podem ajudar os edifícios a tornarem-se mais autossuficientes em termos de necessidades energéticas e a reduzir a dependência da energia fornecida pela rede.
	Aquecimento e resfriamento urbano		A implementação de sistemas urbanos de aquecimento e refrigeração que utilizam fontes centralizadas para fornecer aquecimento e refrigeração a vários edifícios pode aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões.
	Hidrogênio		O hidrogênio limpo é uma medida de descarbonização menos eficiente nos edifícios e prevê-se que a sua utilização seja limitada. O hidrogênio pode ser uma solução de nicho em áreas onde a infraestrutura da rede é fraca ou onde a infraestrutura de gás existente pode ser reutilizada para hidrogênio.



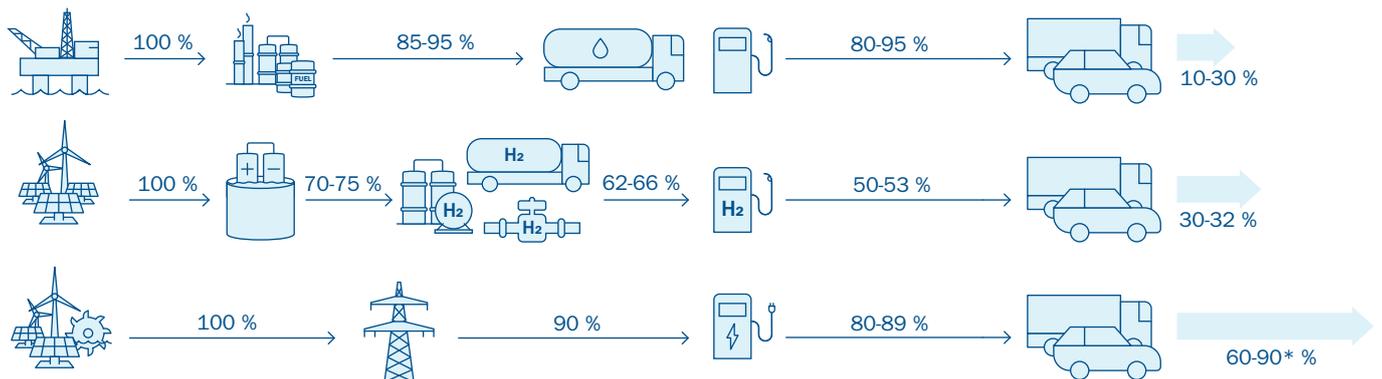
Subsetor	Principais Soluções	
Veículos de Passageiros	Veículos elétricos (VE)	A transição de veículos com motor de combustão interna para veículos elétricos (VE) tem um imenso potencial para reduzir as emissões de CO ₂ e a utilização de energia. Os VE produzem zero emissões de escape e são mais eficientes em termos energéticos em comparação com os veículos tradicionais a gasolina ou diesel, uma vez que um carro elétrico utiliza cerca de um terço da energia de um motor de combustão interna tradicional (Figure 14).
Transporte Comercial	Hidrogênio (amônia e combustível sintético)	Os veículos comerciais e os transportes de longo curso necessitam de biocombustíveis, hidrogênio, amoníaco e combustíveis sintéticos para atingir as metas de emissões exigidas, uma vez que as baterias não são suficientemente densas em energia para percorrer longas distâncias.
	Biocombustíveis	
	Caminhões elétricos	Para distâncias mais curtas, caminhões elétricos são viáveis
Aviação	Combustíveis sintéticos derivados de hidrogênio (E-fuel) e biocombustíveis	As baterias não são suficientemente densas em energia para longas distâncias, fazendo com que os combustíveis sintéticos derivados do hidrogênio sejam a principal solução.
	Eletricidade	A eletrificação de rotas locais e regionais é viável.
Navegação	Amônia livre de emissões	Para longas distâncias, a amônia é necessária.
	Elettrificação e hidrogênio	A eletrificação de rotas locais e regionais é viável.

Descarbonização do setor de transporte com eletricidade e hidrogênio

O setor dos transportes depende fortemente de combustíveis fósseis e contribui significativamente para o consumo global de energia e para as emissões de CO₂. Atualmente, é responsável por aproximadamente 23% das emissões globais de CO₂ relacionadas com a energia, sendo o transporte rodoviário responsável por três quartos das emissões dos transportes.⁵⁶ As emissões restantes dos transportes provêm do transporte marítimo, da aviação e do transporte ferroviário.

No **Low Emissions Scenario**, a frota global de veículos de passageiros será totalmente elétrica em 2050, com uma pequena porcentagem de carros elétricos a hidrogênio. Um automóvel tem uma vida útil esperada de cerca de 15 anos, o que significa que a transformação dos atuais veículos de passageiros em VE levará tempo, desenvolvendo-se em paralelo com o aumento das vendas de VE e a queda dos custos dos VE em comparação com os automóveis convencionais nos próximos anos. Prevê-se que o transporte de longo curso seja uma mistura de caminhões elétricos e híbridos, misturas biológicas e algum gás fóssil. Todos os segmentos de transporte se tornarão mais eficientes e exigirão menos energia para transportar as mesmas mercadorias

14 Ilustração de perdas de energia para veículo elétrico a bateria (EV), veículo com célula de combustível de hidrogênio (HFCV) e motor de combustão interna (ICE)

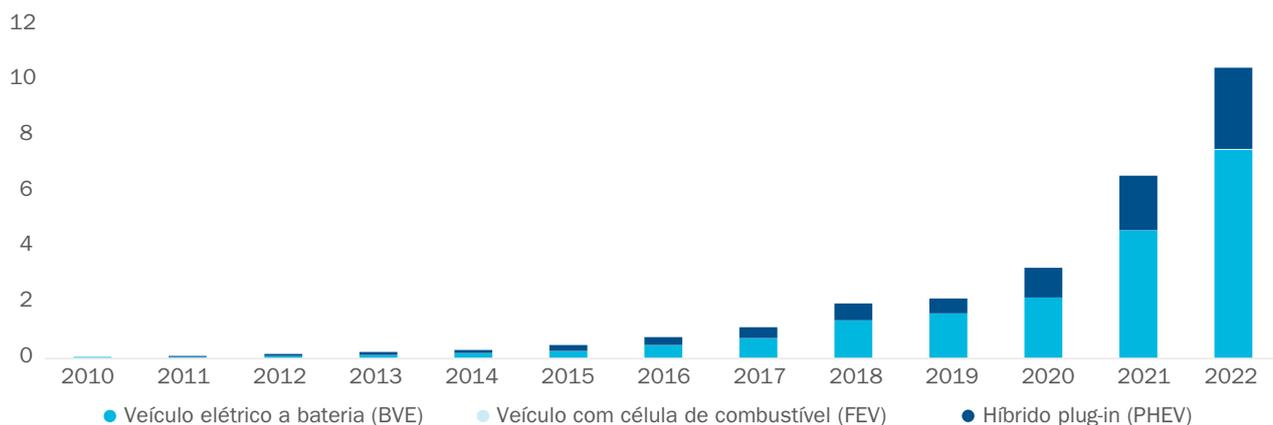


*a extremidade inferior não possui modo de recuperação nos carros elétricos

FACT BOX

Tendências positivas para implantação de veículos elétricos

15 Venda global anual de veículos elétricos (milhões) (2010 – 2022)⁵⁷



As vendas de veículos elétricos (VEs) estão em crescimento exponencial, com mais de 10 milhões de unidades vendidas só em 2022 (Figura 15). Notavelmente, os carros elétricos representaram 14% de todas as vendas de automóveis novos no mesmo ano. A China destaca-se como um dos principais contribuintes, responsável por aproximadamente 60% das vendas globais de veículos elétricos e responsável por mais de metade dos carros elétricos do mundo.

Esta tendência prolongou-se até 2023, com cerca de 5,6 milhões de VE vendidos no primeiro semestre do ano – um aumento impressionante de 35% em comparação com os números do ano anterior.⁵⁸ Vários fatores importantes estão impulsionando esta notável expansão:

- Apesar do aumento dos custos das baterias, os VE estão tornando-se cada vez mais competitivos em comparação aos veículos convencionais.
- Os subsídios governamentais continuam a desempenhar um papel importante. Contudo, apenas cerca de 10% global pode ser atribuída ao apoio governamental. China, Noruega, Reino Unido e vários países da UE reduziram os seus subsídios.
- O mercado de carros elétricos tornou-se altamente competitivo, com novas empresas chinesas oferecendo modelos mais acessíveis.
- Os consumidores têm agora uma seleção mais ampla de modelos para escolher, incluindo SUVs e veículos maiores (tradicionalmente com alto consumo de combustível), que representam cerca de 60% dos modelos de veículos elétricos a bateria (BEV) disponíveis na China e na Europa.
- Políticas de apoio à tarifação do desenvolvimento de infraestruturas estão promovendo um maior crescimento.
- A capacidade de fabricação de baterias está se expandindo, atingindo níveis consistentes com as metas de emissões para 2030.

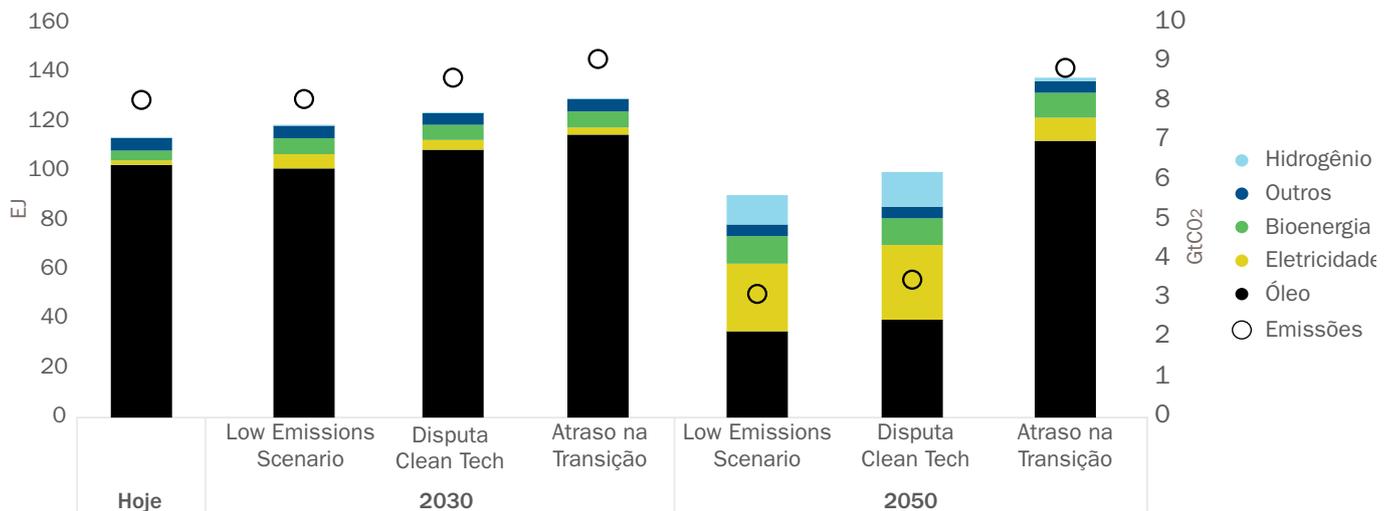
- Espera-se que medidas regulatórias como as políticas da UE Fit-for-55 e as políticas IRA dos EUA impulsionem o crescimento através de emissões de CO₂ mais rigorosas e regulamentações de economia de combustível. Os países estão se esforçando para garantir papéis proeminentes nas cadeias de abastecimento de VE, exemplificado pela Lei da Indústria Net Zero na UE, o IRA nos EUA, e a ênfase da Índia no reforço da produção doméstica de VE e baterias.

Embora a cadeia de fornecimento de veículos elétricos esteja em expansão, a produção permanece concentrada em regiões específicas, com a China liderando o comércio de baterias e componentes de veículos elétricos. Além disso, o crescimento está concentrado nas economias avançadas e na China, deixando o resto do mundo para trás.⁵⁹ As economias emergentes e em desenvolvimento enfrentam obstáculos na adoção de VE devido à falta de incentivos fiscais, infraestruturas inadequadas e preços elevados.

Os subsídios têm desempenhado um papel fundamental na promoção da adoção de VEs em vários países do mundo. Esta abordagem estratégica impulsionou a China a assumir a liderança na produção de VE, com uma produção de quase 6,5 milhões de VE e híbridos plug-in em 2022.⁶⁰ Entretanto, este triunfo não foi alcançado sem o seu próprio conjunto de desafios.

À medida que a China desenvolveu estrategicamente a sua indústria de VE ao longo da última década, os subsídios desencadearam uma consequência não intencional – uma produção excessiva de VE.⁶¹ Inicialmente adotados por empresas de transporte privado, esses veículos rapidamente se tornaram obsoletos como resultado dos rápidos avanços tecnológicos na autonomia das baterias. Isto levou a um acúmulo de VE não utilizados em alguns dos maiores centros urbanos da China, o que serve como uma ilustração comovente de uma das potenciais desvantagens associadas a uma transição impulsionada principalmente por subsídios.

16 Consumo final de energia (EJ) e emissões (GtCO₂) no setor dos transportes



e das pessoas, enquanto se espera que a demanda subjacente de mobilidade cresça. No Low Emissions Scenario, o amoníaco livre de emissões parece tornar-se uma solução fundamental para o transporte marítimo de longa distância até 2050, enquanto os combustíveis eletrônicos, como o metanol eletrônico, desempenham um papel fundamental na aviação. Tanto para o setor marítimo como para o setor da aviação, rotas locais e regionais mais curtas podem ser eletrificadas.

Na Disputa Clean Tech, A redução do comércio mundial e a reestruturação das cadeias de suprimentos globais de veículos isentos de emissões conduzem a aumentos de custos e a atrasos nas metas. Isso resulta em uma eletrificação mais silenciosa em todo o mundo. No entanto, à medida que o mundo resolve os gargalos referentes às cadeias de suprimentos regionais, o crescimento acelera substancialmente a partir de 2030. A natureza da transição impulsionada pelos subsídios conduzirá a um setor dos transportes menos eficiente, com maior demanda de energia e eletricidade em comparação com o Low Emissions Scenario. Mesmo assim, a eletrificação dos transportes será aproximadamente a mesma até 2050 que no Low Emissions Scenario.

No Atraso na Transição, Os subsídios aos veículos elétricos são reduzidos substancialmente à medida que os recursos são transferidos para proteger os consumidores dos preços mais elevados dos combustíveis, e a falta de apoio governamental e de infraestruturas para soluções isentas de emissões (para transportes de longo curso, transporte marítimo e aviação) mantém as emissões no setor dos transportes a um nível elevado. À medida que os governos enfrentam tensões crescentes, tanto a nível mundial como interno, as metas de descarbonização são adiadas. E quando combinado com o aumento do custo de vida, o resultado é uma substituição mais lenta da frota de transportes existente e menos eficiente, retendo assim as emissões durante mais tempo e provocando uma maior demanda de energia. A ausência de preços, ou baixos, sobre as emissões de carbono e a falta de outras políticas resultam em menos reduções de custos para tecnologias não maduras, dificultam a transição para o transporte marítimo e a aviação.

Descarbonização no setor industrial

O setor industrial desempenha um papel crucial no consumo global de energia e nas emissões de carbono. O setor industrial é intensivo em energia e em emissões, consumindo 38% da energia mundial e sendo responsável por cerca de 27% das emissões relacionadas com a energia a nível mundial.⁶² Isso se deve principalmente à fabricação, processamento e outras atividades de produção. Depende fortemente de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural para aquecimento, energia e matéria-prima.

Indústrias como a siderurgia, a do cimento e a química exigem processos de alta temperatura que muitas vezes dependem de combustíveis fósseis, levando a emissões substanciais de CO₂. Estes processos são difíceis de reduzir, o que significa que são difíceis de descarbonizar através da utilização direta de eletricidade, porque requerem temperaturas mais elevadas do que as que a eletricidade pode fornecer.

Embora existam soluções, o caminho para a descarbonização nestas indústrias com utilização intensiva de energia não é isento de desafios. Muitas das tecnologias necessárias ainda estão em fase de protótipo ou demonstração, necessitando de maior desenvolvimento antes da implantação em grande escala. Além disso, vários destes processos de produção inovadores acarretam custos mais elevados. Dada a natureza fortemente competitiva dos mercados globais para produtos da indústria pesada como o aço, as margens de lucro apertadas tornam um desafio a absorção de aumentos substanciais nos custos de produção. Além disso, as instalações industriais são de capital intensivo e têm uma vida útil esperada de cerca de 40 anos, o que complica a rápida transformação.

Considerando estas complexidades, a descarbonização do setor industrial requer uma caixa de ferramentas abrangente de soluções. Equilibrar a inovação tecnológica, o apoio político e os incentivos de mercado torna-se essencial para permitir a transição para um cenário industrial mais sustentável e de baixo carbono.

Subsetor	Principais soluções	
Indústria de baixa temperatura	Eletricidade	A indústria com requisitos de temperatura inferiores a 200°C consome muito menos energia e pode ser descarbonizada com eletrificação.
	Base biológica	A indústria petroquímica utiliza combustíveis fósseis como matéria-prima para produzir produtos químicos e materiais como plásticos, fertilizantes, roupas, cosméticos, etc. O setor exige alternativas, como matérias-primas de hidrogênio de base biológica ou de baixo carbono para a produção de produtos químicos e materiais.
Hidrogênio		
Química	Hidrogênio	O hidrogênio livre de emissões pode ser usado na produção de amônia. O CCUS será fundamental para desecarbonizar a produção química.
	CCUS	
Ferro e aço	Hidrogênio	Substituir o carvão e o gás fóssil por hidrogênio livre de emissões.
Cimento	CCUS	Mudança do carvão para a bioenergia sustentável e/ou implementação de tecnologias CCUS para reduzir as emissões da produção de clínquer.
	Bioenergia	
Indústria	Reciclagem	A reciclagem, bem como a eficiência dos materiais e da energia são as formas mais econômicas de reduzir as emissões relacionadas com a energia e o consumo de energia na indústria. A reciclagem está bem estabelecida em metais, plástico, vidro e papel, mas precisa de escala. O prolongamento da vida útil dos edifícios, a melhoria do design e das técnicas de fabricação, juntamente com a leveza, podem ajudar a reduzir as emissões.
	Eficiência Material	

No **Low Emissions Scenario**, o consumo de energia do setor industrial em 2050 é um pouco inferior ao atual, apesar do crescimento econômico, e o setor registra uma redução de 50% nas emissões de CO₂ relacionadas a energia até 2050, em comparação com o presente. Este resultado surge da melhoria da eficiência energética e da reciclagem, da eletrificação, da adoção de hidrogênio livre de emissões e de alguma implementação de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS).

O processo global de eletrificação das indústrias será gradual, e o Low Emissions Scenario prevê uma transição constante até 2050. Cerca de 38% da demanda global de energia da indústria será satisfeita pelo consumo direto de eletricidade até 2050. O hidrogênio limpo contribui significativamente para a descarbonização da indústria e cobrirá quase 11% da demanda de energia da indústria até 2050. Esta

transição substituirá a utilização de gás fóssil e carvão para matérias-primas químicas, produção de aço e outras aplicações de calor a altas temperaturas.

Na Disputa Clean Tech, os EUA, a UE e a China estabelecem novas indústrias limpas e cadeias de abastecimento robustas que conduzem ao aumento da atividade industrial, ao mesmo tempo que descarbonizam as indústrias existentes e mantêm a competitividade dos custos. Isto é complicado pela expansão mais lenta das fontes de energia renováveis, o que atrasa a implantação do hidrogênio verde, apesar dos subsídios substanciais para o apoiar. O apoio às tecnologias através de subsídios e não da fixação de preços do carbono conduz a soluções menos eficientes e prejudica a eficiência energética e dos materiais. As nações em desenvolvimento investem em tecnologias de combustíveis fósseis para impulsionar o seu crescimento industrial, aumentando assim as emissões.

O setor industrial é intensivo em energia e emissões, consome 38% da energia mundial e é responsável por cerca de 19% das emissões relacionadas com a energia a nível mundial.



Isto resulta numa maior demanda de energia e em mais emissões da indústria, em comparação com o Low Emissions Scenario, especialmente antes de 2035. A trajetória de transição recupera impulso em direção a 2040 e 2050, à medida que os problemas da cadeia de suprimentos são resolvidos. Tecnologia mais eficiente e reciclagem reduzem a demanda de energia, resultando numa implantação acelerada de eletricidade e hidrogênio, que cobrirão 37% e 12% da demanda em 2050, respectivamente.

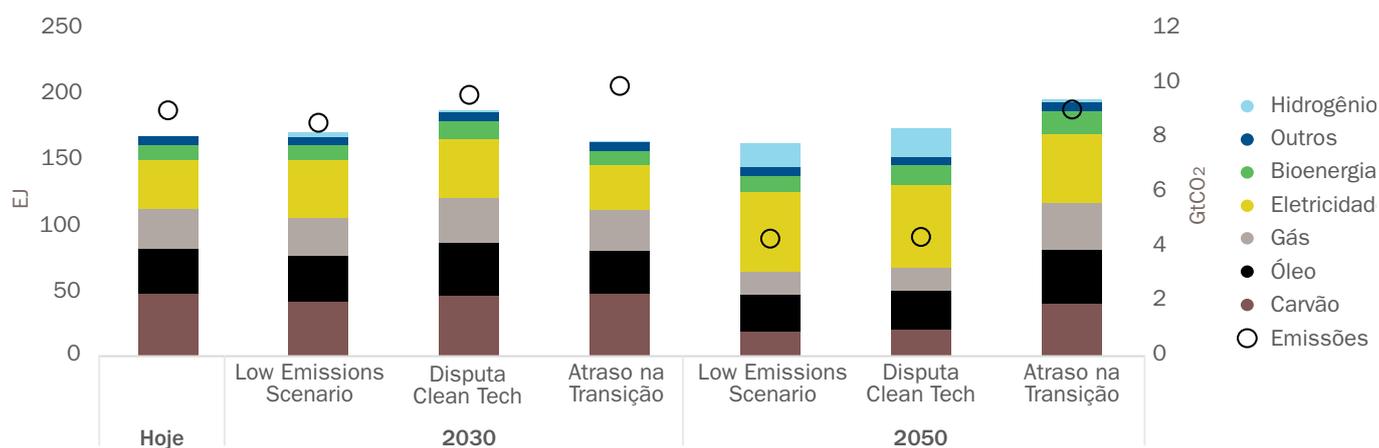
Para o Atraso na Transição, A redução do comércio global contribui para um declínio no crescimento econômico, enquanto as políticas protecionistas orientam a trajetória para indústrias mais nacionalizadas. As políticas climáticas e o avanço das tecnologias para a descarbonização da indústria tornam-se menos prioritários, ofuscados pela ênfase

na proteção dos consumidores contra o aumento dos custos de vida e na salvaguarda de indústrias essenciais. A consequência disto é a continuação das operações das instalações industriais existentes e o estabelecimento de novas instalações baseadas em combustíveis fósseis. A ênfase silenciosa na eficiência de materiais e energia resulta em processos industriais menos eficazes e inovadores.

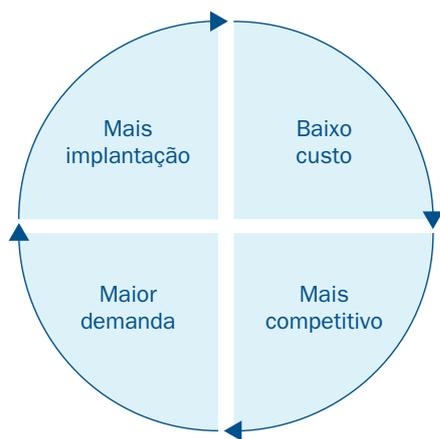
Isto leva a um aumento da demanda e das emissões do setor industrial, 11% e 109% superiores ao Low Emissions Scenario, respectivamente. A falta de desenvolvimento tecnológico leva à pouca implantação de CCUS e hidrogênio, resultando num nível elevado de emissões ao longo do horizonte temporal.



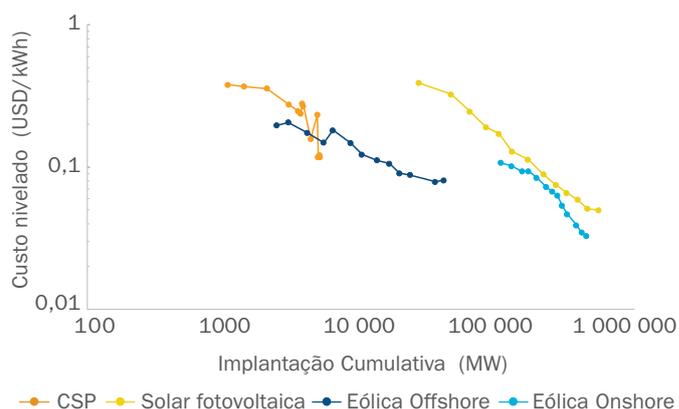
18 Consumo final de energia (EJ) e emissões (GtCO₂) no setor industrial



19 Ciclo virtuoso de implantação de energia renovável.



20 Os efeitos da aprendizagem reduzem o custo das fontes de energia renováveis, 2010-2022⁶⁴



Energias renováveis competitivas impulsionam a transição energética

No Low Emissions Scenario, prevê-se que o consumo de energia mais do que duplique até 2050, sendo 82% desta demanda satisfeita por fontes renováveis. A energia solar fotovoltaica emerge como a tecnologia dominante de geração de energia, registrando um aumento de 22 vezes em relação aos níveis atuais. A energia eólica onshore e a energia eólica offshore também crescem excepcionalmente. Em todos os cenários, as emissões são reduzidas à medida que a energia eólica e solar econômica substitui os combustíveis fósseis na geração de energia.

O mundo necessita de grandes quantidades de energia renovável para reduzir as emissões em todos os setores de utilização final. A eletrificação extensiva, tanto direta como indireta através da implantação do hidrogênio verde, deve começar em paralelo com a descarbonização do setor energético. Além disso, mais de 760 milhões de pessoas ainda não tinham acesso à eletricidade em todo o mundo em 2022, dificultando o crescimento econômico e o desenvolvimento.⁶³ Descarbonizar a produção de energia e, ao mesmo tempo, fornecer a eletricidade necessária no futuro é um grande desafio, mas tecnológica e economicamente viável.

Felizmente, as fontes de energia renováveis sofreram um declínio de custos sem paralelo nas últimas décadas. O custo da energia eólica e solar onshore diminuiu 69% e 87%, respectivamente, desde 2010 (Figura 20), e a capacidade de produção cresceu em conformidade, à medida que estas reduções de custos e políticas climáticas se reforçaram mutuamente. As políticas climáticas ajudaram a reduzir o custo das energias renováveis e as energias renováveis mais baratas reduziram o custo do cumprimento das metas climáticas. Como resultado, a energia solar e a eólica estão, cada vez mais, superando a concorrência das tecnologias de combustíveis fósseis, não apenas das novas centrais de combustíveis fósseis, mas também das já existentes.

As energias renováveis substituem a energia fóssil em todos os cenários, mas a velocidades diferentes

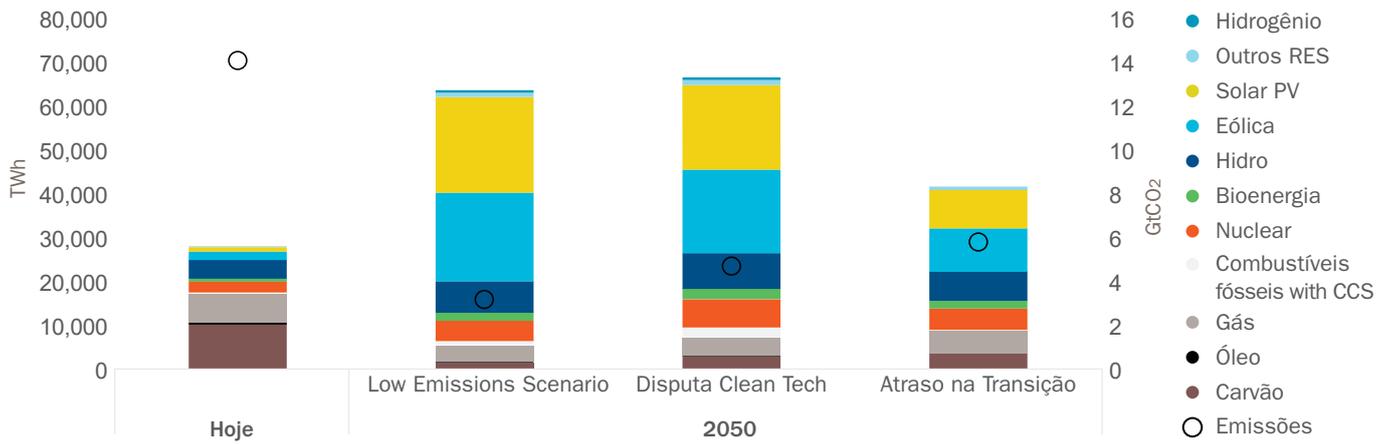
Devido à competitividade dos custos da energia eólica e solar, a mudança dos combustíveis fósseis

para as energias renováveis na produção de energia continua em todos os nossos cenários. A magnitude e a velocidade da eletrificação dos setores de utilização final, no entanto, variam substancialmente.

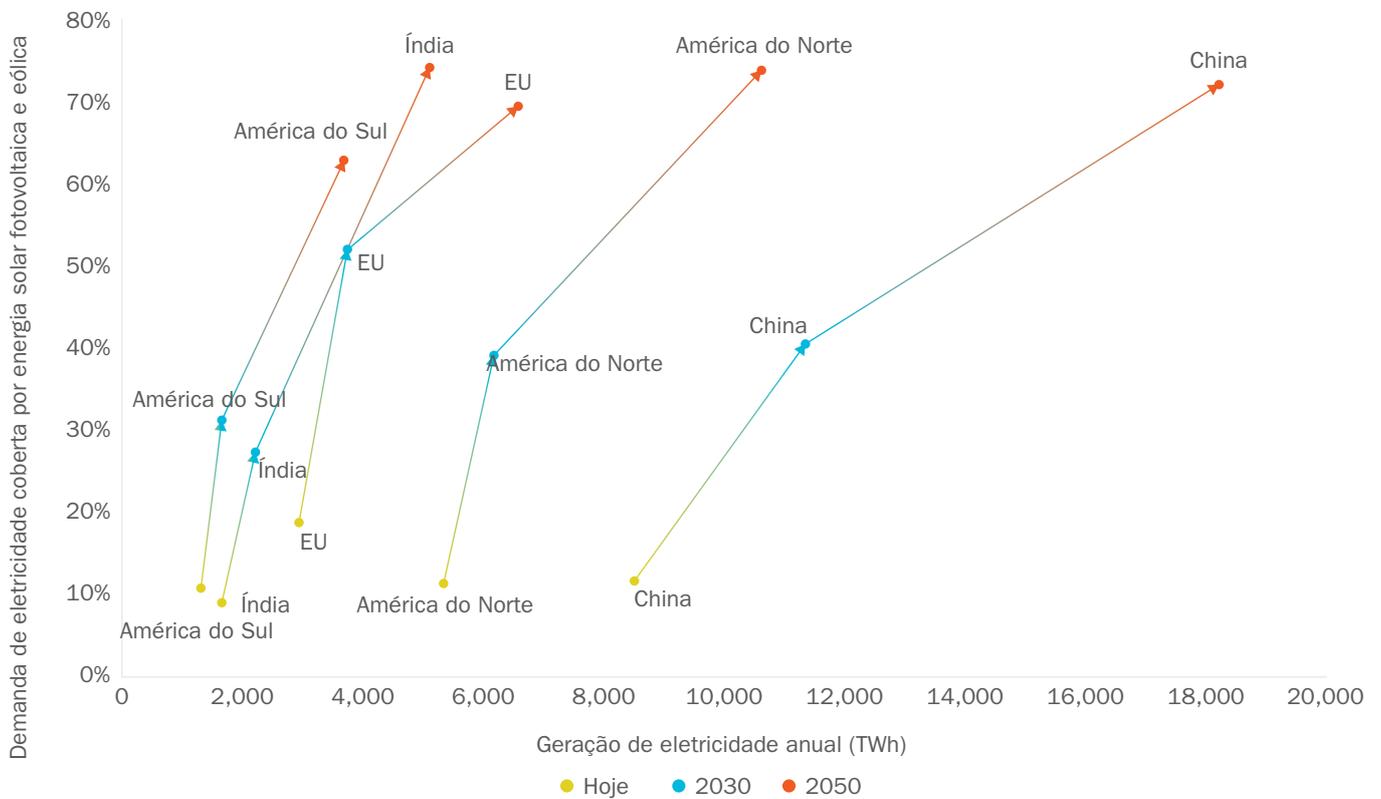
No Low Emissions Scenario, o consumo de energia mais do que duplicará dos níveis de 2021 até 2050 (Figura 21). A energia solar e eólica fornecerá a maior parte da nova geração de energia necessária para cobrir esta demanda, ao mesmo tempo que substituirá a geração existente de combustíveis fósseis. Em alguns países e regiões, a quota da energia eólica e solar cobrirá mais de 70% da demanda de eletricidade em 2050 (Figura 22). Até 2050, 82% da geração global de energia será gerada por fontes de energia solar, eólica, bioenergia, hídrica ou outra energia renovável, levando a uma redução de 77% nas emissões de CO₂ do setor energético em comparação com os níveis de 2021.

No cenário da Disputa Clean Tech, a transição energética é impulsionada pela competição pelo domínio das cadeias de suprimentos renováveis. Na sequência do desenvolvimento de novas cadeias de valor e da falta de unidade global, os custos aumentarão no curto prazo. Esta situação diminui a dinâmica dos esforços de redução das emissões, provocando uma trajetória desacelerada e mais exigente do ponto de vista financeiro, em comparação com o Cenário de Baixas Emissões. Como os subsídios politicamente orientados direcionam os investimentos verdes neste cenário, em vez de políticas orientadas para o mercado, como o preço do carbono, as tecnologias implementadas podem nem sempre ser as mais eficazes. Isto poderia

21 Geração de energia (TWh) por tecnologia e emissões anuais do setor elétrico (GtCO₂) em 2050 para os cenários de transição



22 Demanda regional de eletricidade suprida por energia solar fotovoltaica e eólica no cenário de baixas emissões



levar a métodos mais caros para descarbonizar o setor energético, como a energia nuclear e a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS).

Além disso, a eficiência energética global será inferior, especialmente nos setores dos transportes e da indústria, conduzindo a uma demanda total de energia mais elevada em comparação com o Low Emissions Scenario. A prevalência da produção baseada em combustíveis fósseis continua a ser mais elevada devido à integração mais lenta das fontes renováveis. A quota de geração renovável em 2050 é de 76% no cenário de Disputa Clean Tech, 7 pontos percentuais inferior ao Low Emissions Scenario.

No cenário de Atraso na Transição, maior incerteza geopolítica, maior protecionismo e aumento da pobreza dificultam a transição energética. Com enfoque no

crescimento econômico e na segurança energética, ao invés de na ação climática sustentável, a utilização de combustíveis fósseis continua a prevalecer tanto nos setores da energia como no setor da utilização final. Com menos eletrificação, a demanda global de energia permanece muito mais baixa do que no Low Emissions Scenario e na Disputa Clean Tech, mas as fontes de energia renováveis ainda representarão dois terços do mix energético até 2050, devido à sua competitividade de custos, mesmo no cenário de Atraso na Transição. A produção eólica e solar cresce quase 6,5 vezes (2021 - 2050), ilustrando como a queda dos custos da energia solar, da energia eólica terrestre e das baterias impulsionou a transição energética que perdura, mesmo num caso em que as políticas climáticas estão enfraquecidas. Isto resulta em emissões substancialmente mais baixas do setor energético, mesmo neste cenário.



Local: Emmen, Holanda

A energia solar fotovoltaica é vencedora em todos os cenários

A geração de energia a partir de painéis solares fotovoltaicos é uma tecnologia muito estabelecida que mesmo décadas após a sua invenção ainda registra um rápido desenvolvimento tecnológico, tanto em termos de ganhos de eficiência como de redução de custos. Entre as fontes de energia renováveis, a solar fotovoltaica tem o menor tempo de construção. Outros benefícios da energia solar incluem seu perfil de produção previsível. Isto reduz os custos do sistema em comparação com a geração de energia eólica, embora aumente a necessidade de armazenamento de baterias, expansão da rede e armazenamento sazonal.

A energia solar é pioneira global no **Low Emissions Scenario**. Num mundo caracterizado pelo comércio internacional e pelo intercâmbio científico, beneficia-se de cadeias de suprimentos globais bem desenvolvidas e assiste a mais avanços tecnológicos e redução de custos. Isto prepara a energia solar fotovoltaica para um crescimento massivo no Low Emissions Scenario – com um aumento de 22 vezes atingindo o impressionante patamar de 22.000 TWh de eletricidade produzida anualmente até 2050.

No cenário de **Disputa Clean Tech**, a taxa global de implementação de energia solar fotovoltaica é semelhante ao Low Emissions Scenario pós-2030. Mas a capacidade

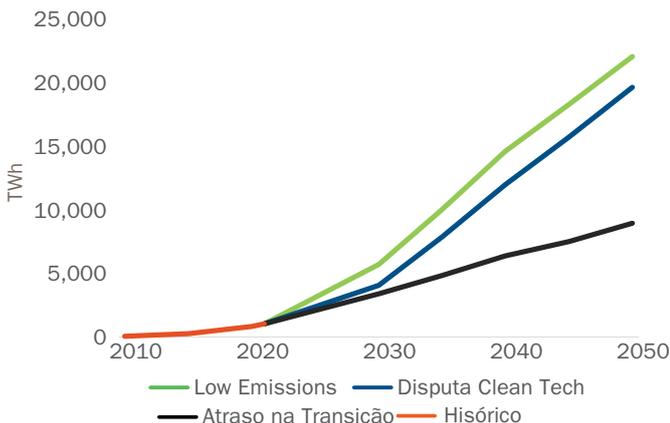
cumulativa de energia solar fotovoltaica está aquém do Low Emissions Scenario devido à menor atividade de construção na década de 2020, quando as cadeias de abastecimento regionais ainda precisam ser estabelecidas.

Por outro lado, o cenário de **Atraso na Transição** carece deste boom solar. A ausência de um impulso climático leva a uma procura de energia muito menor, contribuindo para um menor crescimento da capacidade solar. Ainda assim, os custos de produção favoráveis levam a um aumento de quase nove vezes na produção de energia solar até 2050, em comparação com o nível atual.

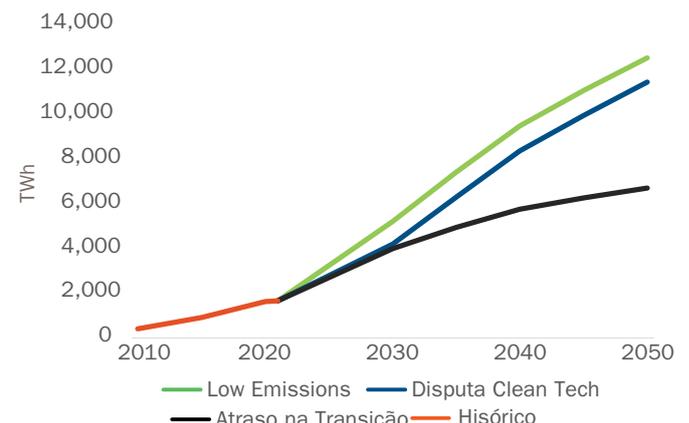
A energia eólica onshore é a fonte de energia mais econômica em muitas regiões

A energia eólica onshore é outra grande pioneira no setor energético global e destaca-se como a fonte de energia com melhor relação custo-benefício em inúmeras regiões. Prevemos um aumento de oito vezes na geração de energia eólica onshore, atingindo quase 12.500 TWh até 2050 no **Low Emissions Scenario**, possibilitado pelo aumento do tamanho das turbinas e maiores investimentos. No entanto, a expansão enfrenta desafios terrestres e de rede (**ver Focus Grid**), além da resistência local. Várias iniciativas já estão surgindo com o objetivo de enfrentar estes desafios, como áreas designadas como “go-to” para energias renováveis através do Plano REPower da UE.⁶⁵

23 Desenvolvimento da produção de eletricidade a partir de energia solar fotovoltaica (TWh)



24 Desenvolvimento da produção de eletricidade a partir de energia eólica onshore (TWh)





A geração de energia eólica alcançada no cenário de **Disputa Clean Tech** assemelha-se muito à do Low Emissions Scenario após 2030, com um desenvolvimento mais lento na década de 2020. Em comparação com a energia solar fotovoltaica, no entanto, o atraso é menos pronunciado, principalmente porque a atual cadeia de abastecimento da energia eólica terrestre é consideravelmente menos concentrada do que a cadeia de suprimentos da energia solar fotovoltaica.

No cenário de **Atraso na Transição**, a produção eólica onshore não aumenta tanto como nos outros dois cenários devido à falta de apoio político e à menor demanda de eletricidade. Mas devido ao seu baixo custo, a geração de energia a partir de parques eólicos onshore ainda regista um aumento de mais de quatro vezes em relação ao nível atual.

O crescimento da energia eólica offshore acelera em 2030 – mais afetado pelo atraso na transição

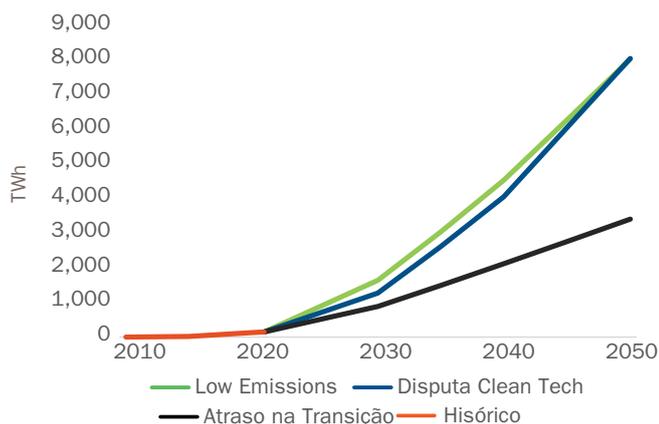
Em comparação com a energia eólica onshore, a energia eólica offshore é uma tecnologia menos madura. A partir de hoje, a necessidade de basear turbinas eólicas offshore no fundo do mar limita o seu potencial de construção. No entanto, a partir do final da década de 2020, os avanços tecnológicos nos parques eólicos offshore flutuantes permitirão um crescimento acentuado no **Low Emissions Scenario**. Portanto, só em 2040 é que a energia eólica

offshore experimentará um crescimento semelhante às taxas de crescimento da energia eólica e solar onshore apresentadas na década de 2020. Ainda assim, a produção de energia eólica offshore atinge 8.000 TWh anualmente em 2050, em comparação com 12.400 TWh da energia eólica onshore, mas a partir de um ponto de partida muito inferior em 2021 (144 TWh vs 1.590 TWh).

Prejudicada pelo intercâmbio tecnológico restrito entre blocos geopolíticos e pela luta por matérias-primas críticas, a energia eólica offshore retoma mais tarde o cenário de **Disputa Clean Tech**, apenas para alcançar o Low Emissions Scenario até 2050.

Na falta dos regimes de apoio necessários, o desenvolvimento tecnológico e as reduções de custos são muito mais lentos, e a energia eólica offshore não experimenta uma implantação acelerada no cenário de **Atraso na Transição**, atingindo apenas 3.400 TWh de produção anual de eletricidade em 2050.

25 Desenvolvimento da produção de eletricidade a partir de energia eólica offshore (TWh)



A partir de hoje, a necessidade de basear turbinas eólicas offshore no fundo do mar limita o seu potencial de construção

Energia Eólica Offshore

À medida que a energia eólica offshore continua a ganhar destaque como um catalisador crucial para acelerar a transição energética global, inúmeras regiões estão a preparar-se para um crescimento robusto desta tecnologia. Este crescimento será impulsionado pelo desenvolvimento de turbinas eólicas maiores e mais eficientes, o que contribuirá ainda mais para reduções contínuas de custos na indústria.

APROVEITANDO OS VENTOS DA MUDANÇA

O cenário global para o desenvolvimento da energia eólica offshore está enfrentando uma transformação dinâmica impulsionada por vários fatores. Metas nacionais ambiciosas, acontecimentos geopolíticos e políticas em mudança estão impulsionando um número crescente de projetos em todo o mundo, levando a um aumento de capacidade. Além disso, a energia eólica offshore oferece um perfil de produção mais estável em comparação com a energia terrestre, uma vez que os parques se beneficiam de velocidades de vento mais elevadas e consistentes, resultando numa geração de energia mais confiável e previsível. Além disso, uma vez que estes parques eólicos não estão situados em terra, as preocupações com o ruído e o impacto visual são atenuadas, aumentando a sua aceitabilidade entre as comunidades locais.

Na **Europa**, o conflito em curso entre a Rússia e a Ucrânia aumentou o foco na energia eólica offshore, à medida que os países procuram a sustentabilidade energética e pretendem reduzir a dependência das importações russas de combustíveis fósseis. Consequentemente, prevê-se um aumento notável nas adições de capacidade à medida que as nações aumentam as suas metas eólicas offshore e numerosos projetos estão fazendo progressos nos seus respectivos calendários de desenvolvimento. Com uma capacidade instalada de quase 30 GW e metas nacionais definidas que totalizam mais de 350 GW a serem atingidas até 2050, a **Europa** está preparada para alcançar um crescimento significativo na energia eólica offshore.⁶⁶

Os Estados Unidos estão registrando um impulso na indústria das energias renováveis, estimulado pela Lei de Redução da Inflação (IRA). A administração Biden estabeleceu a meta de instalar 30 GW de energia eólica offshore até 2030, marcando a primeira meta nacional de energia eólica offshore do país.⁶⁷

Na Ásia, a **Coreia do Sul e o Japão** estão emergindo como protagonistas principais na energia eólica

flutuante offshore. Ambos os países estão testemunhando o desenvolvimento de projetos de maior dimensão nas fases iniciais de planejamento, demonstrando um interesse crescente neste setor. O Vietname, com recursos eólicos abundantes, tem como meta 6 GW de energia eólica offshore até 2030, enquanto a **China** estabeleceu um recorde ao construir aproximadamente 17 GW de energia eólica offshore só em 2021, sinalizando o seu compromisso com um mercado de energia mais limpo. **Taiwan** também implementou metas eólicas offshore significativas, visando 13 GW de capacidade até 2030.⁶⁸

Na América Latina, países como **Brasil, Colômbia e Uruguai** estão adotando novas políticas e regulamentações para promover o crescimento da indústria eólica offshore, representando uma mudança de paradigma na região.⁶⁹

No geral, estas tendências globais destacam o crescente impulso e importância da energia eólica offshore como uma solução energética sustentável, e está preparada para desempenhar um papel crucial na transição energética global.

NAVEGANDO EM ÁGUAS TURBULENTAS

Cadeia de Suprimentos

A expansão da indústria eólica offshore e o cumprimento das metas estabelecidas representam desafios significativos, apesar dos esforços regulatórios e do rápido crescimento. Os principais gargalos da cadeia de suprimentos e outros obstáculos podem prejudicar a eficiência e a rápida expansão da energia eólica offshore. Os principais gargalos incluem a disponibilidade limitada de embarcações e equipamentos especializados para instalação e manutenção, a falta de profissionais qualificados na indústria, bem como longos prazos de entrega e logística complexa para fabricação e transporte de componentes maiores de turbinas eólicas.

Os recentes desafios da cadeia de abastecimento global tiveram um impacto significativo neste setor, manifestando-se em atrasos nos projetos e no aumento dos custos. Destacou-se a vulnerabilidade da indústria eólica offshore às perturbações globais, salientando a importância de diversificar as fontes da cadeia de suprimentos, reduzir a dependência de regiões ou países únicos e implementar estratégias robustas de gestão de riscos. Várias análises indicam que a indústria eólica poderá estar caminhando

para uma escassez na cadeia de suprimentos nos próximos anos, o que reforça a importância de resolver estes gargalos de produção.⁷⁰

Custos

Em termos gerais, a energia eólica offshore continua a ser menos competitiva em termos de custos quando comparada com as principais energias renováveis, devido à forte dependência de subsídios para o seu desenvolvimento. A pressão por turbinas eólicas “superdimensionadas” traz vantagens, mas também desvantagens. Embora ofereçam maior produção de energia e eficiência, os custos iniciais mais elevados e a necessidade de investimento constante para aumentar continuamente o tamanho da turbina são um encargo financeiro para os fabricantes. Alguns defendem uma pausa no desenvolvimento de turbinas maiores para aliviar a pressão financeira e permitir a especialização e otimização dos modelos existentes.⁷¹

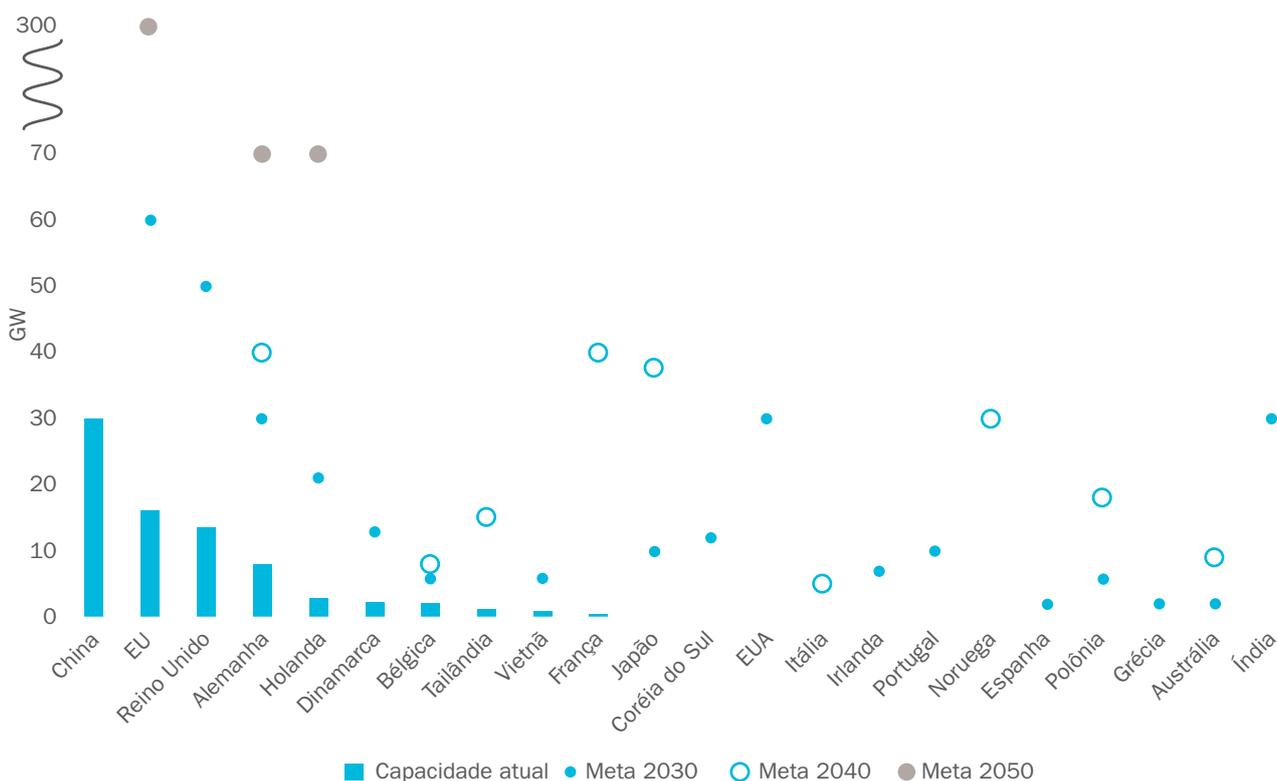
Para muitas áreas do mundo, os melhores recursos eólicos estão em partes do mundo onde a profundidade do mar exige instalações offshore flutuantes. A energia eólica flutuante offshore é uma tecnologia menos madura e é caracterizada por custos mais elevados em comparação com a energia eólica offshore fundação fixa, devido ao design complexo, à engenharia especializada e aos

requisitos de instalação. Fatores como profundidades de água mais profundas e maturidade limitada do mercado contribuem ainda mais para o aumento dos custos, o que resulta na necessidade de maiores subsídios para desenvolver esta opção hoje. No entanto, o vento flutuante oferece benefícios como acesso a ventos mais fortes e menor impacto visual. Espera-se que os avanços contínuos reduzam os custos e aumentem a viabilidade econômica da energia eólica offshore flutuante, de modo que, em alguns casos, possa tornar-se mais barata do que a energia eólica offshore fundação fixa.

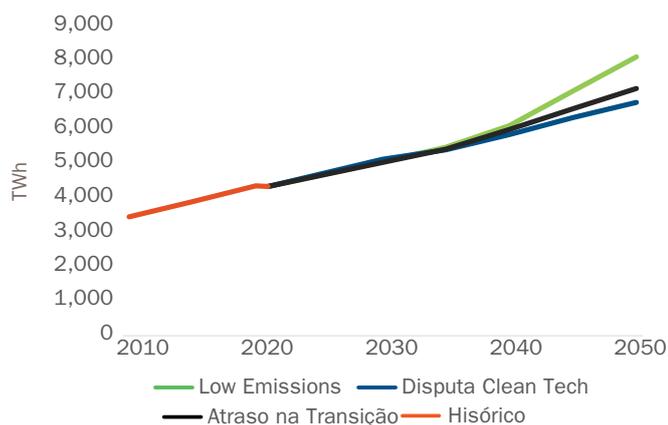
EXPANDINDO O POTENCIAL

A indústria eólica offshore está à beira de um crescimento significativo, graças a grandes investimentos, turbinas eólicas maiores e mais eficientes e um forte foco na redução de custos. No entanto, para aproveitar ao máximo esta oportunidade, precisamos enfrentar os desafios acima mencionados. Os fornecedores do setor estão se preparando para atender à crescente demanda por projetos eólicos offshore. Estão trabalhando para criar uma cadeia de suprimentos robusta que possa acompanhar a rápida expansão da indústria. A concorrência entre estes fornecedores é feroz, obrigando-os a encontrar constantemente formas de reduzir custos e melhorar todo o setor.

26 Metas da energia eólica offshore



27 | Desenvolvimento da produção de eletricidade a partir de energia hidroelétrica (TWh)

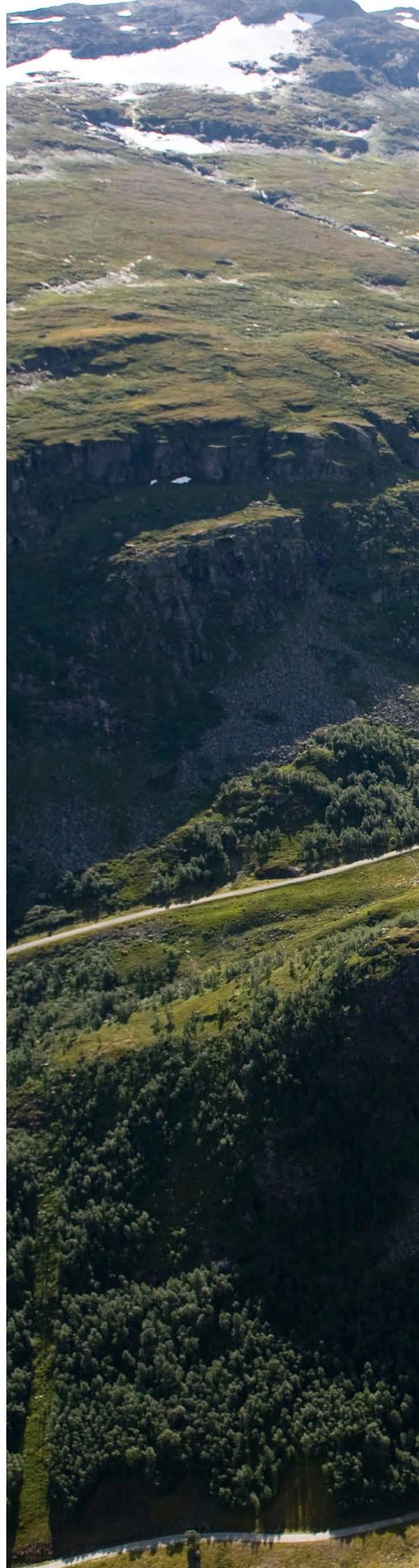


A energia hidrelétrica fornece flexibilidade valiosa ao sistema

Em 2021, a energia hidrelétrica foi a principal fornecedora mundial de eletricidade renovável, gerando quase 50% mais eletricidade do que a energia solar e eólica combinadas.⁷² Fornecer produção flexível de eletricidade é uma qualidade única para a energia hidrelétrica em comparação com outras tecnologias renováveis, funcionando tanto como um gerador de energia limpa quanto como uma solução vital de armazenamento. A energia hidrelétrica também ajuda a estabilidade da rede, facilitando a integração de fontes intermitentes como a solar e a eólica. Mas o potencial da energia hidrelétrica é limitado e não suporta um aumento multiplicado da capacidade, como acontece com a energia eólica e solar. Ainda assim, **o Low Emissions Scenario** prevê um crescimento constante na produção de energia hidrelétrica, resultando num aumento de produção de 66% em 2050 em comparação com 2021. À medida que as centrais elétricas flexíveis de combustíveis fósseis são gradualmente eliminadas, a energia hidrelétrica torna-se a tecnologia de produção de energia flexível dominante.

O foco na segurança energética no cenário de **Disputa Clean Tech** leva os países ricos em energia hídrica a explorar a sua vantagem competitiva. Aceitando o impacto ambiental adicional da construção de mais centrais hidrelétricas, a produção atingirá mais de 8.000 TWh anualmente em 2050, 13% mais do que no Low Emissions Scenario.

Apesar do menor foco na transição verde, a energia hidrelétrica ainda representa uma fonte barata de produção de eletricidade flexível no cenário de **Atraso na Transição**, que evita as oscilações de preços dos combustíveis fósseis. Portanto, ainda regista um crescimento significativo e fornece 6.800 TWh de eletricidade anualmente até 2050, apenas 6% menos do que no Low Emissions Scenario.

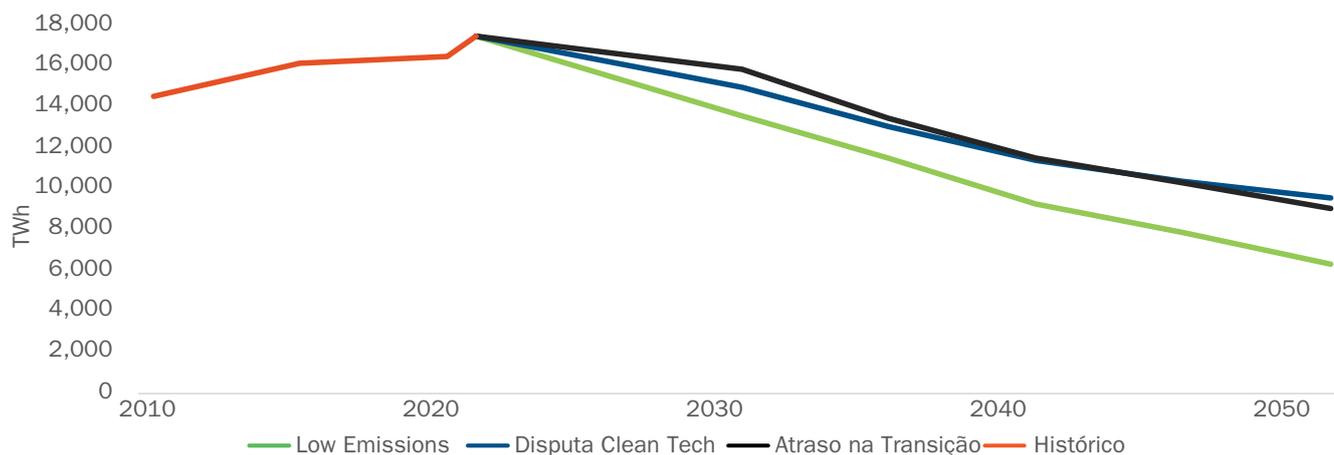


Apesar do menor foco na transição verde, a energia hidrelétrica ainda representa uma fonte barata de produção de eletricidade flexível no cenário de Atraso na Transição, evitando as oscilações de preços dos combustíveis fósseis

A geração de gás e carvão é atualmente a maior fontes para geração de energia em todo o mundo, responsável por 36% e 23% do mix de energia



28 | Desenvolvimento da produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis (TWh)



Os combustíveis fósseis diminuem em todos os cenários

A produção de gás e de carvão são atualmente as maiores fontes de produção de energia a nível mundial, responsáveis por 36% e 23% do mix energético, respectivamente, e novas gerações de carvão e de gás serão construídas em vários países da Ásia.

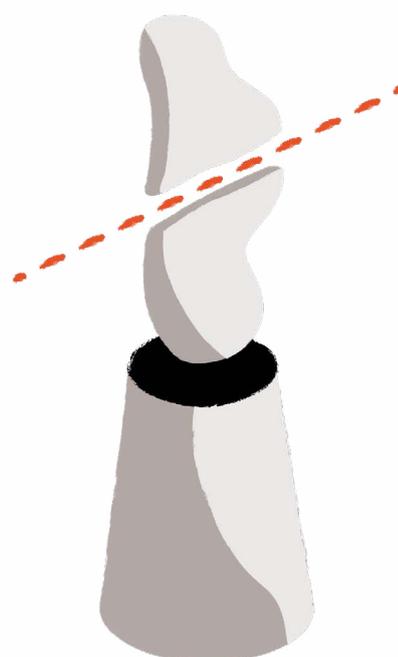
No **Low Emissions Scenario**, a energia do carvão mantém-se em alguns países carboníferos da Ásia até 2050, incluindo a China, a Índia e a Indonésia. Dado que o carvão é uma parte integrante da sociedade nestes países, criando empregos e reforçando a segurança energética, é necessário um maior apoio governamental e regulamentação para que estes países diversifiquem e se afastem das usinas de energia a carvão sem equipamentos de tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). A captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) constitui uma opção viável para reduzir as emissões nos grandes países carboníferos. No entanto, prevê-se que a CCUS tenha um papel relativamente moderado no setor da energia, uma vez que os custos serão elevados em comparação com outras alternativas isentas de emissões.

Esperamos, portanto, que o mix de energia contenha 2,6% de carvão ininterrupto e 5,8% de gás fóssil em 2050. O gás fóssil continua a ser uma solução fundamental em muitos países, necessária para equilibrar a quota crescente de energias renováveis intermitentes até 2050, ao mesmo tempo que emite menos emissões de do carvão ininterrupto gases de efeito estufa em comparação com outra geração de energia a partir de combustíveis fósseis.

No **cenário de Disputa Clean Tech**, o atraso no crescimento das energias renováveis leva a uma maior produção de combustíveis fósseis ao longo do horizonte temporal – especialmente nos países em desenvolvimento, uma vez que são construídas centrais de combustíveis fósseis com longa vida útil em vez de energias renováveis, bloqueando as emissões a longo

prazo. Em 2050, mais centrais elétricas a carvão e a gás serão modernizadas com CCUS para prolongar a sua vida útil e evitar ativos irrecuperáveis. Ao mesmo tempo, isto proporcionará ao setor energético a flexibilidade necessária e emissões relativamente baixas. A geração total a partir de combustíveis fósseis cai em mais de 8.000 TWh de hoje até 2050.

Mesmo no **Atraso na Transição**, a produção de energia a partir de combustíveis fósseis cai aproximadamente de 50%. A demanda total de energia é substancialmente mais baixa, mas a produção de energia a partir de combustíveis fósseis também enfrenta dificuldades devido ao menor comércio global e aos preços mais elevados dos combustíveis fósseis, bem como à dificuldade em competir com energias renováveis de baixo custo.



A geração total a partir de combustíveis fósseis cai quase 8.000 TWh de hoje até 2050 na Disputa Clean Tech

Geração de energia nuclear

Nas últimas décadas, a energia nuclear tem lutado para avançar em muitos países desenvolvidos. A Europa e os EUA lutam contra uma frota envelhecida, com novos projetos assombrados por atrasos e custos crescentes, enquanto as economias asiáticas em rápido crescimento, especialmente a China e a Índia, têm mais de 30 reatores em construção.

Depois de vários anos em que a tendência era o abandono da energia nuclear, esta fonte de energia voltou recentemente ao debate público. Influenciados pelo foco crescente nas energias renováveis, muitos consideram a energia nuclear uma fonte de eletricidade estável e isenta de emissões. A invasão russa da Ucrânia desencadeou um importante ponto de virada para a energia nuclear, colocando a independência energética como um argumento adicional para a energia nuclear. Num mundo assolado por tensões geopolíticas crescentes, o acesso à energia nuclear tornou-se um ativo estratégico.

OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA A ENERGIA NUCLEAR EM MEIO A UMA CRISE CLIMÁTICA

A energia nuclear é considerada uma tecnologia madura e tem sido uma parte importante do mix energético global há décadas, proporcionando uma produção estável de eletricidade com emissões operacionais de CO₂ insignificantes.

Dispendiosas e complexas: Sendo máquinas grandes e complexas, com um conjunto pesado de regulamentações de segurança, as centrais nucleares são inerentemente dispendiosas e demoram muito tempo para se construir. Os projetos de reatores têm evoluído constantemente, proibindo efeitos significativos de aprendizagem e reduções de custos (ver Fact Box). Além disso, estas centrais são conhecidas pelos atrasos na construção e pelos excessos orçamentais – pelo menos nos países desenvolvidos – fazendo com que a maioria dos investidores privados evitem a energia nuclear sem apoio governamental.⁷³

Risco da cadeia de suprimentos: A energia nuclear pode parecer promissora em termos de independência energética. O urânio combustível nuclear pode ser encontrado em vários lugares e tem baixo custo, mas o fornecimento e a indústria de seu refinamento estão concentrados em poucos países.⁷⁴ O processamento de urânio também é um dos segredos mais bem guardados do mundo, e a mineração de urânio causa enormes danos ambientais.

Efeitos ambientais: As centrais nucleares também são responsáveis por outros impactos ambientais significativos. Devido à grande quantidade de concreto e aço utilizada na construção das usinas, o processo construtivo causa elevadas emissões. O ambiente local

é afetado pela necessidade das fábricas de um fluxo constante de água de resfriamento, que normalmente é retirada dos rios locais. A água quente que retorna ao rio pode colocar em perigo a vida selvagem aquática. Além disso, a necessidade de água deixa as operações nucleares vulneráveis a secas e baixos níveis de água, como foi o caso da França em 2022. Contudo, um dos aspectos mais críticos da energia nuclear do ponto de vista social são os resíduos radioativos que serão prejudiciais durante os próximos milênios; e o armazenamento seguro deste material continua a ser uma questão não resolvida.

Segurança: A energia nuclear tem regulamentos de segurança muito rigorosos e, catástrofes nucleares como as de Chernobyl e Fukushima, são altamente improváveis. O risco existe, mas muitas vezes exagerado. Quando colocada em perspectiva, a energia nuclear é mais segura do que outras fontes de energia.⁷⁵

Expertise: Um longo período de hibernação esgotou a competência e os trabalhadores qualificados da indústria nuclear em muitos países. Para um renascimento nuclear, uma nova geração de trabalhadores e engenheiros deve ser formada e a indústria transformadora deve ser ampliada. Um renascimento nuclear não é, portanto, uma solução para a grave crise climática.

UM RECOMEÇO?

Os pequenos reatores modulares (SMRs) são um novo caminho para a energia nuclear que promete superar alguns dos obstáculos dos atuais projetos de reatores convencionais. SMR significa um reator de pequena escala (≤ 300 MW de potência elétrica de saída) com design modular. A maioria das peças SMR pode ser potencialmente pré-fabricada em uma planta de fabricação antes de ser montada no site. A concepção uniforme e a produção em massa de SMR podem aumentar os efeitos de aprendizagem e as economias de escala em comparação com os reatores convencionais, o que levaria a reduções de custos. A partir de hoje, a SMR está em fase piloto com muitos participantes no campo de desenvolvimento de SMR distribuídos globalmente. Para concretizar os efeitos de escala e a produção em massa, no entanto, apenas alguns podem emergir com sucesso, e ainda precisa ser provado que a SMR pode cumprir a sua principal promessa de redução de custos. Até agora, estes reatores enfrentam os mesmos obstáculos que os seus equivalentes convencionais: atrasos, explosões de custos, abastecimento de combustível, tratamento de resíduos e regulamentação. Nos países desenvolvidos, não esperamos ver SMR ligados à rede antes de 2030. E como a implantação e expansão em massa levarão tempo, não terão potencial para contribuir significativamente para o mix energético antes do final dessa década.

FACT BOX

O custo da energia nuclear

Devido aos efeitos de aprendizagem e expansão, a maioria das tecnologias torna-se mais barata à medida que são implementadas. No entanto, a produção de energia nuclear nos países desenvolvidos resistiu de alguma forma a esta tendência, com as novas centrais a tornarem-se mais caras. Há várias razões para isso:

- As centrais nucleares são máquinas grandes e complexas e, portanto, inerentemente caras
- O longo tempo de construção causa custos de financiamento adicionais significativos
- O aumento da regulamentação de segurança tornou a construção mais cara ao longo do tempo, especialmente para projetos já em construção
- Mudanças constantes no design probem efeitos de aprendizagem ou de escala

- Muitos fabricantes recuam dos requisitos complexos para produtos de qualidade nuclear, em comparação com produtos de qualidade normal da indústria – levando a menos fornecedores, menos concorrência e, portanto, preços de materiais mais elevados
- Longos períodos de pouca ou nenhuma atividade de construção esgotaram a indústria da construção nuclear, que necessita dolorosamente de recuperar a experiência perdida.

Os projetos asiáticos (principalmente chineses, russos e indianos) são aparentemente mais competitivos, uma vez que beneficiam de amplo apoio estatal, taxas de juros mais baixas, mão-de-obra mais barata, um ambiente regulamentar menos rigoroso e atividade de construção contínua (força de trabalho formada e experiente).

29 :: Eventos significativos e desenvolvimento de custos da energia nuclear⁷⁶

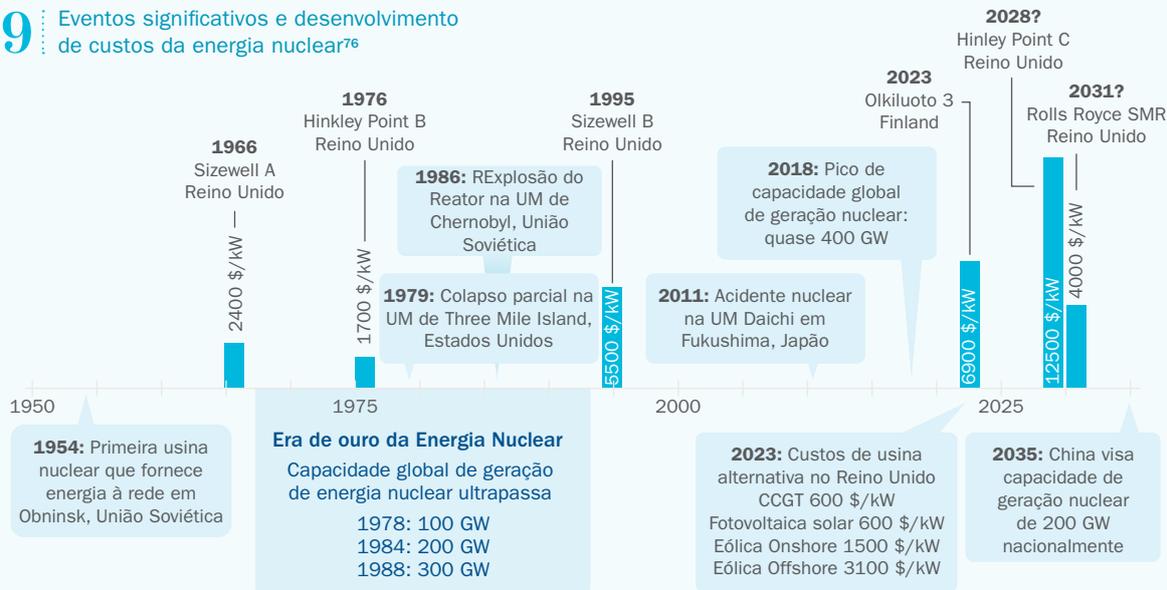
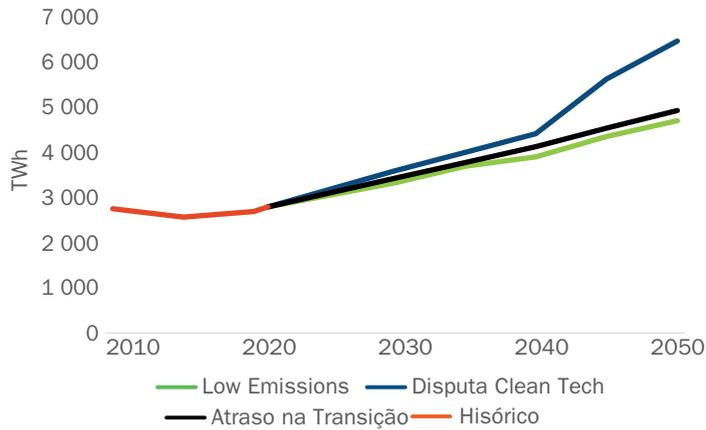


Tabela 1 :: Resumo das oportunidades e desafios da energia nuclear à luz da crise climática

Opportunities	Desafios
Nenhuma emissão operacional de gases de efeito estufa	É intensivo em capital e requer apoio governamental – demasiado arriscado para investidores privados
Sem poluição atmosférica local	Longo tempo de construção
Produção de energia de carga base	Notório por atrasos e estouros de orçamento*
Pegada de área comparativamente pequena	Questão não resolvida de resíduos radioativos
Pouco impacto na vida selvagem local	Abastecimento de combustível prejudicial ao meio ambiente e dominado por poucos países
Em princípio, tecnologia madura	Emissões significativas de gases de efeito estufa durante a construção
	Falta de mão de obra experiente*
	Risco de acidentes nucleares

*Em países desenvolvidos

30 : Desenvolvimento da produção de eletricidade a partir de energia nuclear (TWh)



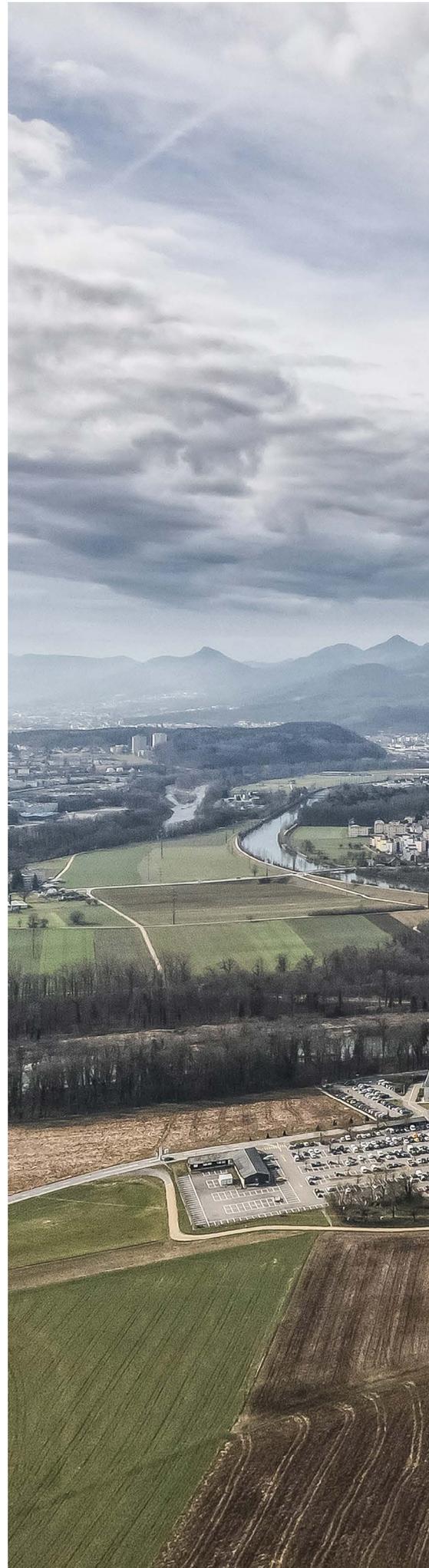
Os custos e os longos prazos limitam o papel da energia nuclear no Low Emissions Scenario

Embora o debate público nos países desenvolvidos se concentre nos desafios da produção de energia nuclear (incidentes, tratamento de resíduos, uma frota de reatores envelhecida, novas construções com custos excessivos e atrasos no start-up), esta forma de energia registrando um boom em outras partes do mundo. A nível mundial, 60 reatores estão atualmente em construção, com mais de metade localizados na Índia e na China, e muitos mais estão por vir.⁷⁷ Como fonte de energia de base com baixa intensidade de CO₂, a energia nuclear desempenhará um papel significativo em todos os três cenários.

No **Low Emissions Scenario**, o foco na redução das emissões de CO₂ faz com que alguns países apostem na energia nuclear como fonte alternativa de energia. Isto leva a um crescimento constante e a produção de eletricidade a partir de energia nuclear aumenta em cerca de 70% por cento até 2050. No entanto, os principais desafios da geração de energia nuclear (ver **Foco: Geração de Energia Nuclear**) inibem uma construção massiva suficiente para ser uma alternativa à energia eólica e solar.

O cenário de **Atraso na Transição** prevê uma trajetória semelhante, mas aqui a força motriz para uma construção nuclear não é a redução das emissões de CO₂, mas sim a segurança energética. Num mundo caracterizado por tensões geopolíticas, o acesso à energia nuclear torna-se um trunfo estratégico.

A mesma razão impulsiona a expansão nuclear no cenário de **Disputa Clean Tech**. É promovida tanto pelo fornecimento de energia com baixo teor de carbono, que é procurada para eletrificar os setores de utilização final, como pela sua contribuição para a independência energética nacional. Grandes investimentos em investigação e desenvolvimento conduzem a novos tipos de reatores que são maciçamente implantados a partir de 2040, aumentando a produção anual de energia nuclear para 6 500 TWh em 2050.





Globalmente, 60 reatores estão atualmente em construção, com mais de metade localizados na Índia e na China e muitos mais por vir

Rede de Energia

Embora o aumento da produção de energia renovável seja fundamental para a transição para a energia verde, a infraestrutura da rede é crítica para garantir a utilização eficiente da energia produzida. A rede elétrica assume assim um papel central no processo de transição energética. É necessário acomodar a crescente demanda de eletricidade proveniente dos veículos elétricos, do aquecimento e da indústria com utilização intensiva de energia, e assegurar um fornecimento confiável e eficiente de eletricidade num contexto de intermitência crescente da rede devido a uma maior porcentagem de fontes renováveis.

PREENCHENDO A LACUNA: DISPONIBILIZANDO ENERGIA LIMPA

Para substituir a energia fóssil por energia limpa, é importante uma ampla modernização da rede elétrica, para lidar tanto com o aumento da intermitência da produção de energia como com o aumento da procura de energia. Para atingir emissões líquidas zero até 2050, a Agência Internacional de Energia estima que os investimentos em redes de transmissão e distribuição devem aumentar de US\$ 340 bilhões (2021) para US\$ 680 bilhões em 2030.⁷⁸

A natureza intermitente das fontes de energia renováveis, aliada à produção descentralizada e ao aumento da demanda de energia, apresenta desafios aos operadores da rede para manterem a estabilidade e a fiabilidade, bem como para integrarem os volumes no sistema. Em paralelo com as complexidades emergentes do lado da oferta, o lado da demanda segue uma trajetória semelhante, impulsionada pela rápida eletrificação dos setores de edificações, dos transportes e da indústria. A rede elétrica foi projetada para lidar com variações de corrente na demanda

31 :: As complexidades do gerenciamento da rede



de maneira bastante eficaz. Contudo, com o aumento da eletrificação, a demanda de energia durante as horas de ponta está aumentando. Se todos num subúrbio carregassem os seus VE, cozinhassem e ligassem a máquina de lavar simultaneamente após o trabalho, isso causaria um elevado risco de corte de energia, uma vez que a rede não está dimensionada para este pico de procura elevado.

A FALTA DE DESENVOLVIMENTO DA REDE PODE ATRASAR A TRANSIÇÃO

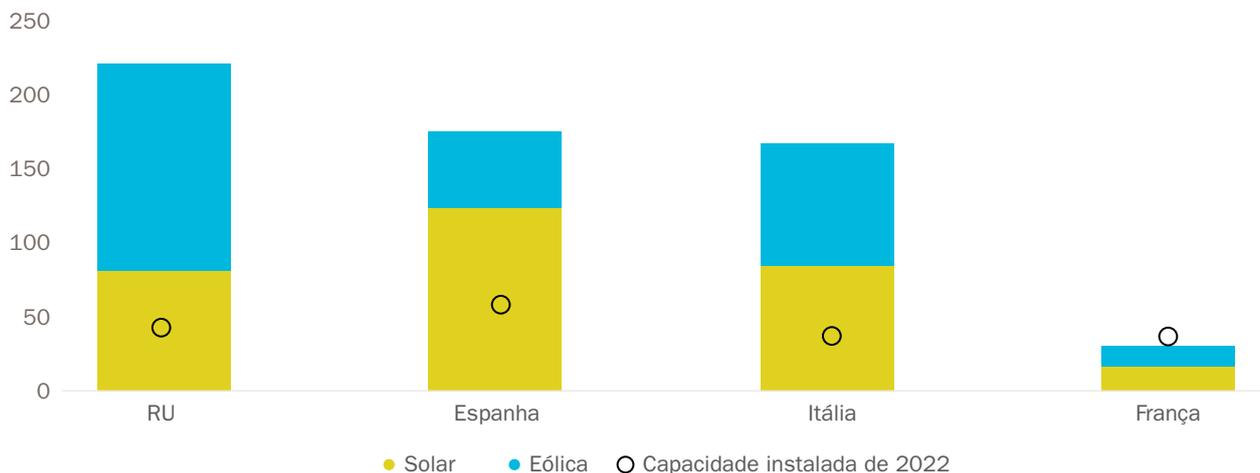
A rede poderá constituir um gargalo na transição verde, como mostra o crescente atraso de projetos renováveis que aguardam autorização de ligação à rede. A fila de interconexão está atualmente retendo quase 1.000 gigawatts de projetos solares nos EUA e na Europa⁷⁹, o que representa aproximadamente quatro vezes a capacidade solar global instalada em 2022. Além disso, mais de 500 gigawatts de projetos de energia eólica aguardam ligação à rede, o que representa cinco vezes a capacidade eólica construída em 2022. Com muitos novos projetos renováveis a serem comissionados, os operadores da rede enfrentam uma importante tarefa de conectar os projetos à rede existente.

A mudança significativa no mix energético nas próximas décadas exige atualizações regulamentares e estruturais para dar resposta ao mercado atual.

Soluções como sistemas de armazenamento de energia, gestão do lado da demanda e tecnologias de redes inteligentes podem ajudar a gerir eficazmente o aumento da intermitência. Além disso, melhorar a interconectividade da rede e promover a coordenação transfronteiriça são vitais para uma rede elétrica eficiente e resiliente.

O prazo médio para novas linhas de transmissão aéreas na Europa e nos EUA é atualmente de cerca de dez anos, com sete anos alocados para planeamento e licenciamento e três anos para construção.⁸¹ Para evitar que a rede se torne um grave gargalo na transição energética, é imperativo que os investimentos na rede sejam acelerados.

32 Projetos eólicos e solares aguardando conexão à rede (sem dados para a Alemanha)(GW)⁸⁰





Location: Talayuela Solar Plant, Spain

← As energias eólica e solar são complementares até certo ponto. Normalmente há pouco vento quando o sol está brilhando e vice-versa

A flexibilidade no sistema energético é crucial para a transição energética

Ao contrário de outras commodities de energia, como o petróleo ou o gás, a eletricidade não pode ser armazenada em quantidades significativas. Numa rede de energia estável, a oferta e a demanda devem estar em equilíbrio em todos os momentos. Logisticamente, isso é relativamente simples num sistema energético baseado em combustíveis fósseis, com fornecimento constante de carga base e alguns ativos de gás flexíveis para equilibrar as variações da demanda. A potência de saída das fontes renováveis de energia eólica e solar, por outro lado, não pode ser regulada para cima ou para baixo, mas essencialmente depende do tempo. Essas fontes são, portanto, chamadas de “intermitentes”. Atualmente, estas fontes representam cerca de 10% do mix de energia, que pode ser bem gerido por ativos flexíveis baseados em combustíveis fósseis na rede para equilibrar estas oscilações de saída.

A necessidade de flexibilidade crescerá em paralelo com a crescente participação de energias renováveis. Uma transição eficiente em custo para energias limpas será largamente dominada pela energia solar e eólica, tendo em conta os custos associados ao fornecimento de flexibilidade.

No Low Emissions Scenario, prevemos que estas fontes renováveis aumentem para substanciais 67% em todo o mundo até 2050, com algumas regiões a registando uma participação ainda maior. Isso está alargando os limites do que é possível num sistema de energia – aumentando assim a demanda por flexibilidade. Embora a pesquisa apoie a viabilidade de sistemas de energia totalmente renováveis, outras alternativas de energia limpa poderiam ser mais eficientes em custo se a percentagem de energia eólica e solar exceder os níveis projetados no Low Emissions Scenario.

Sistemas de energia bem conectados e tecnologias renováveis complementares reduzem a necessidade de flexibilidade

Normalmente, é ótimo em termos de custos expandir a energia solar e eólica em regiões com uma elevada percentagem de energia renovável variável, uma vez que os recursos eólico e solar muitas vezes se complementam. Isso é especialmente verdadeiro para regiões maiores com boas interconexões. Em geral, os sistemas de energia interligados reduzem a necessidade de outras soluções de flexibilidade, uma vez que o sistema maior se beneficia das diferenças em cada sistema de energia e aumenta o acesso a soluções flexíveis.

Este princípio de complementação de fontes de energia e conectividade à rede não se aplica apenas à energia eólica e solar, mas também a outras energias renováveis. Tomemos o exemplo de duas regiões: uma rica em energia eólica barata mas intermitente e a outra com uma ampla oferta de energia hidrelétrica flexível mas limitada. O primeiro enfrenta um déficit de abastecimento quando o vento não sopra, o outro pode não ter fluxo suficiente para os reservatórios para fornecer energia durante todo o ano. Ao ligar estas regiões através de interligações, como fizeram a Noruega e o Reino Unido, os seus pontos fortes singulares complementam-se. Quando o vento sopra, ele fornece energia elétrica suficiente para que a água dos reservatórios seja economizada para períodos de pouco vento. Esta configuração colaborativa permite que o sistema combinado opere da melhor forma.

Flexibilidade - desde a demanda atendendo à oferta até a oferta atendendo à demanda

Não existe solução mágica para proporcionar flexibilidade nos sistemas de energias renováveis. Em vez disso, a necessidade de flexibilidade será provavelmente fornecida por múltiplas fontes e soluções.

Serviços do sistema – fornecendo inércia, frequência e equilíbrio para a rede

Quando a oferta e a demanda estão desequilibradas, ou mais energia é retirada do sistema do que fornecida ou mais energia é fornecida ao sistema do que retirada. Em ambos os casos, a frequência da rede irá desviar-se da frequência projetada (50 Hz na Europa), o que pode perturbar o funcionamento dos dispositivos elétricos e até levar a cortes de energia.⁸²

O “primeiro nível de defesa” da rede contra mudanças de frequência é simplesmente a inércia física. Hoje, a maior parte da energia é fornecida por geradores (em usinas de energia movidas a combustíveis fósseis ou hidrelétricas) que ditam a frequência – máquinas grandes, pesadas e de rotação rápida que contêm grandes quantidades de energia rotacional que é imediatamente alimentada na rede numa situação de sub-oferta ou absorvida da rede numa situação de excesso de oferta. À medida que substituímos grandes quantidades de energia fóssil por energia solar e eólica, em que a eletricidade é produzida diretamente a partir de energia da luz solar e eólica, a estabilidade do sistema energético pode ser desafiada. Portanto, serão necessárias outras tecnologias, como geradores síncronos dedicados, para proporcionar a estabilização da rede.

Contudo, a energia rotacional fornecida pela inércia dos geradores, embora grande, é finita. Assim, a “segunda linha de defesa” é chamada de “rampa rápida”. Refere-se à capacidade de ajustar rapidamente a geração de eletricidade para cima ou para baixo em resposta a mudanças na demanda ou na oferta. Fontes de energia de rampa rápida, como usinas elétricas a gás natural, usinas hidrelétricas ou certos tipos de sistemas de armazenamento de energia, desempenham um papel crucial na resposta rápida a estas mudanças. No futuro, as baterias serão vitais para fornecer rampa rápida, pois podem reagir imediatamente a desequilíbrios no sistema com uma resposta de frequência rápida.

Flexibilidade intradiária de curto prazo

Os países e regiões com uma elevada participação de energia

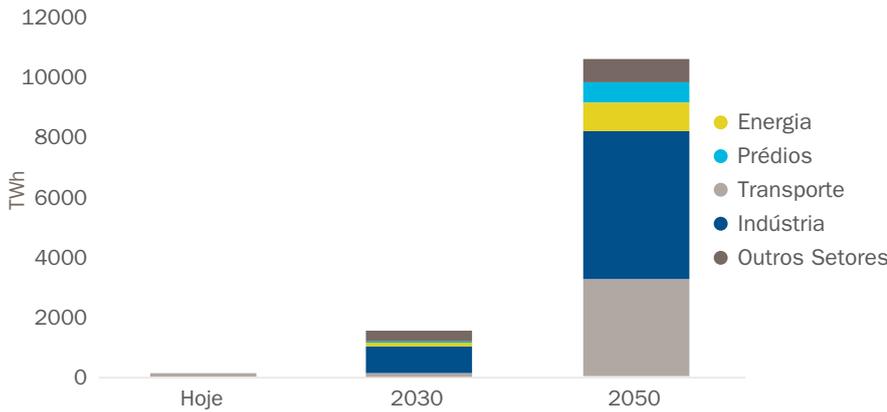
solar e eólica necessitarão de soluções que movam a oferta de horas de alta geração (ao meio-dia, quando o sol está alto) para horas em que a demanda é maior (normalmente de manhã e à noite), chamada flexibilidade intradiária. É provável que a necessidade de tal flexibilidade a curto prazo seja satisfeita através de múltiplas soluções. Além da **energia hidrelétrica** com ou sem bombeamento, as **baterias** são consideradas uma tecnologia fundamental para proporcionar flexibilidade por períodos mais curtos de tempo, como algumas horas. No caso das baterias, espera-se que os custos diminuam em linha com o aumento constante do volume total de baterias produzidas. A **resposta à demanda** envolve muitas soluções para ajustar os padrões de consumo de eletricidade de acordo com as variações no fornecimento de energia. Isso será cada vez mais importante à medida que a flexibilidade do lado da oferta diminuir. Além disso, soluções como a utilização flexível da eletricidade em sistemas de aquecimento e outros tipos de acoplamento do setor; a produção flexível de energia limpa e até mesmo tecnologias de armazenamento atualmente imaturas podem adicionar flexibilidade de curto prazo valiosa. Estas soluções podem explorar as futuras diferenças de preços durante o dia com uma maior participação de energia solar fotovoltaica no mix de energia, reduzindo assim a volatilidade dos preços a curto prazo.

Flexibilidade de longo prazo cobrindo semanas e meses

Garantir flexibilidade durante períodos mais longos, abrangendo semanas, meses, estações e até anos, ajuda a gerir situações como períodos prolongados de vento fraco, aumento da demanda de energia durante o inverno ou variações nas necessidades de energia entre diferentes meses ou anos. Quanto à flexibilidade a curto prazo, satisfazer estas demandas de flexibilidade a longo prazo requer uma combinação de uma vasta gama de soluções. Para áreas com acesso à energia hidrelétrica flexível, a modernização e expansão da infraestrutura hidrelétrica existente surge como uma estratégia eficiente em custo, e isenta de emissões para tratar desses requisitos de flexibilidade aumentada no mercado de eletricidade. Outras regiões poderão recorrer a soluções de armazenamento de hidrogênio a longo prazo.

Outras soluções que podem contribuir para a flexibilidade a longo prazo incluem interligações entre áreas com diferentes padrões de tempo e combinações de energia, energia nuclear, energia a gás natural com CCUS, bioenergia e sistemas de aquecimento flexíveis que podem utilizar outros portadores de energia além da eletricidade durante períodos de demanda excessiva de eletricidade.

33 Consumo global de hidrogênio limpo por setor no Low Emissions Scenario (TWh)



O papel do hidrogênio

A produção de hidrogênio renovável tem potencial para desempenhar um papel significativo na descarbonização global e ser uma importante fonte de consumo flexível de energia. As crescentes ambições climáticas estão mudando o foco para áreas onde a eletrificação como meio de redução de emissões não é viável. Isso significa que o hidrogênio limpo se tornará mais predominante no sistema energético.

Tal como descrito anteriormente neste relatório, o hidrogênio como estoque de abastecimento e como portador de energia pode ser uma solução importante para descarbonizar setores difíceis de reduzir, como a produção de aço ou o transporte de longa distância, por exemplo. Além disso, os eletrolisadores produtores de hidrogênio podem ajustar de forma flexível o seu consumo de energia de acordo com a disponibilidade de alimentação: produzindo em períodos de muita luz solar e interrompendo a produção quando há pouco vento, por exemplo.

O custo dos eletrolisadores e o preço da energia determinarão o preço do hidrogênio verde, e espera-se que os custos diminuam devido a uma maior padronização, automação e melhorias tecnológicas. Os custos do hidrogênio azul, por outro lado, dependem em grande parte do custo do gás fóssil e da CCUS. O custo de capital do hidrogênio azul

será consideravelmente superior ao da produção de hidrogênio cinza sem captura de carbono. Ao mesmo tempo, os custos operacionais aumentarão. Além disso, o custo de transporte e armazenamento de carbono pode ser considerável.

À medida que os eletrolisadores se tornarem mais flexíveis, eles também poderão fornecer serviços de sistema. Os eletrolisadores, portanto, não apenas fornecerão flexibilidade horária, diária e semanal, mas também serão flexíveis o suficiente para interromper ou iniciar a produção em questão de minutos, ajudando o sistema de energia a lidar com desequilíbrios de frequência de curto prazo devido a previsões incorretas de sol e vento, interrupções nas usinas elétricas, etc.

A flexibilidade proporcionada pelo hidrogênio no sistema de energia pode ser maior se o hidrogênio for armazenado. Para regiões com diferenças sazonais significativas nos preços da energia,

como no Noroeste da Europa, o armazenamento sazonal pode ser benéfico. O armazenamento em cavernas de sal é projetado como o método mais econômico por períodos mais longos. Os tanques comprimidos são preferíveis para armazenamento de curto prazo – por exemplo, em locais com elevada participação de energia solar fotovoltaica, como o Chile, onde o armazenamento de hidrogênio



← Hydrogen as a feedstock and as an energy carrier can be a solution to decarbonise hard-to-abate sectors like steel production or long-distance transport

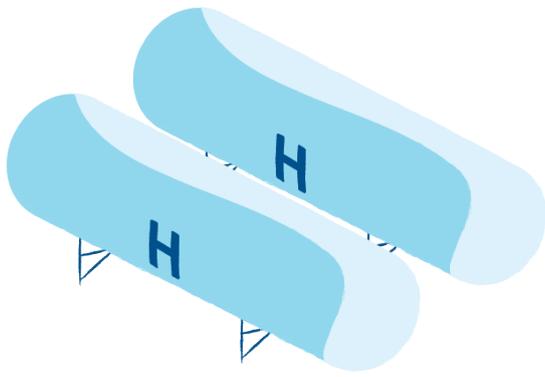
amônia, embora isso acarrete custos adicionais.

Quantidades substanciais de energia são perdidas ao gerar energia a partir do hidrogênio. Primeiro, cerca de 20% a 30% da energia é perdida no eletrolisador e, posteriormente, outros 40% são perdidos na geração de energia (a menos que o calor residual seja utilizado em outros setores, como o aquecimento em bairros). Isso implica uma perda total de energia de 60% a 70%. No entanto, em algumas situações, como semanas de inverno com baixa produção de energia renovável e elevado consumo, a falta de outras alternativas pode implicar que a geração de energia baseada no hidrogênio seja uma solução atrativa de energia de pico livre de emissões. O custo de investimento para turbinas a hidrogênio é relativamente modesto em comparação com soluções alternativas, o que é crucial para a capacidade de produção com horas de funcionamento limitadas.

pode ser utilizado para manejar as diferenças de preços durante o dia.

No curto prazo, a produção de hidrogênio estará provavelmente localizada perto de sites com elevada demanda industrial ou de transporte devido à infraestrutura limitada de hidrogênio. Ao longo do tempo, espera-se que a infraestrutura de transporte de hidrogênio se expanda. Os caminhões, que transportam

hidrogênio comprimido ou líquido, são a escolha econômica para pequenos volumes e distâncias curtas. Os gasodutos de combustíveis fósseis reaproveitados serão apropriados para volumes maiores e distâncias médias, e a conversão dos gasodutos existentes em gasodutos de hidrogênio poderia criar um mercado europeu de hidrogênio conectado. O transporte marítimo de longa distância pode ser convertido para



A competitividade do hidrogênio verde melhorará ao longo do tempo, influenciada pelos preços da energia e dos combustíveis fósseis, regulamentos, impostos, preços do carbono e apoio

- O hidrogênio renovável (ou “verde”) é produzido a partir de energia renovável num eletrolisador e é isento de emissões.
- O hidrogênio “azul” é produzido a partir de gás fóssil com CCS e é 90%-95% livre de emissões, enquanto o hidrogênio “cinzento” é produzido a partir de gás fóssil sem CCS e emite 9,9 tCO₂/tH₂
- O hidrogênio “cinzento” é predominantemente produzido a partir de gás fóssil através da reforma do vapor-metano (SMR), e é utilizado principalmente em refinarias para remover o enxofre dos combustíveis e na produção de amoníaco hoje, responsável por cerca de 2% das emissões globais de gases com efeito de estufa.

A procura de hidrogênio está hoje dividida quase meio a meio entre refinarias de petróleo e produção de amoníaco. No **Low Emissions Scenario** da Statkraft, o consumo de hidrogênio aumentará para três vezes o consumo atual em 2050 e se tornará 100% livre de emissões, substituindo gradualmente todo o consumo de hidrogênio fóssil existente no mundo e contribuindo para a descarbonização das emissões difíceis de reduzir nos setores da indústria e dos transportes (Figura 33). O aumento da demanda total de hidrogênio até 2050 resultará principalmente de novas utilizações do hidrogênio, como na indústria siderúrgica e no transporte de longa distância (incluindo a amônia limpa para o transporte marítimo). No final deste período, veremos também alguma demanda de hidrogênio nos edifícios e no setor energético. O hidrogênio limpo abrangerá quase 9% da demanda global de energia até 2050.

No cenário de **Disputa Clean Tech**, a utilização do hidrogênio enfrenta vários desafios. O desenvolvimento e a redução de custos de tecnologias essenciais, como os eletrolisadores avançados, são fundamentais e exigem investimentos significativos e avanços inovadores, que poderiam ser facilitados através de subsídios oportunos na Disputa Clean Tech. No entanto, a dependência do hidrogênio em fontes de energia renováveis é dificultada por gargalos

na cadeia de suprimentos no setor das energias renováveis, que prejudicam o seu potencial de crescimento no curto prazo. Além disso, a ausência de um mecanismo abrangente de precificação do carbono diminui os incentivos para as indústrias abandonarem o hidrogênio cinzento menos ecológico, levando potencialmente a um aumento da demanda de hidrogênio em comparação com o Low Emissions Scenario. Além disso, a falta de consenso internacional sobre normas e pesquisa leva ao atraso da adoção mais ampla do hidrogênio com baixas emissões, uma vez que a sua implementação bem sucedida também depende do estabelecimento de sistemas eficientes de armazenamento e transporte para apoiar a sua utilização generalizada.

À medida que os obstáculos da cadeia de suprimentos global forem ultrapassados e a tecnologia se tornar mais eficiente em custos, o crescimento do hidrogênio irá acelerar. Esta aceleração começará na China, nos EUA e na Europa, com outras regiões a seguirem o exemplo, conforme o desenvolvimento tecnológico e o excesso de oferta impulsionados pelos subsídios se espalham. Em suma, o crescimento da demanda de energia decorrente do aumento da utilização de hidrogênio é cerca de 25% superior no cenário da Disputa Clean Tech do que no Low Emissions Scenario.

No cenário de **Atraso na Transição**, vemos uma implantação muito limitada do hidrogênio até 2050. Um fator crítico que contribui para este atraso é a ausência de iniciativas políticas robustas para impulsionar a integração da tecnologia do hidrogênio. A falta de um impulso político claro prejudica o investimento e a inovação do setor privado, travando o progresso necessário. Para agravar a questão, a integração insuficiente das energias renováveis no mix de energia também limita todo o potencial da produção flexível de hidrogênio.

Além disso, o armazenamento, o transporte e a distribuição do hidrogênio necessário são em grande parte insuficientes. Esta deficiência impede a escalabilidade das soluções de hidrogênio nas indústrias e nos setores de transporte. Os elevados custos associados à modernização das infraestruturas existentes e o ceticismo quanto à sua viabilidade a longo prazo são obstáculos ao investimento em grande escala. Na ausência de normas e regulamentos internacionais, o caminho para a adoção do hidrogênio torna-se ainda mais difícil. A falta de diretrizes harmonizadas aumenta os custos, dificulta a colaboração e limita as perspectivas de implementação global, reduzindo o progresso do hidrogênio na cena internacional.

Os gasodutos de gás fóssil reaproveitados servirão volumes maiores e distâncias médias, e a conversão dos gasodutos existentes em gasodutos de hidrogênio poderá criar um mercado europeu de hidrogênio conectado



FACT BOX

Os orçamentos de carbono quantificam quanto mais CO₂ o clima pode tolerar

A atmosfera da Terra funciona como uma estufa. A radiação solar é absorvida pela superfície da Terra e reemitida como radiação térmica. Parte dela escapa para o espaço, enquanto outra parte é refletida de volta para a Terra através de moléculas no ar – os chamados gases de efeito estufa – que retêm o calor no planeta. O perfeito equilíbrio entre a radiação refletida e a transmitida é o que torna a Terra um planeta habitável, nem muito frio nem muito quente, e para manter esse equilíbrio, a composição da nossa atmosfera é crítica. Por cerca de 200 anos, os humanos queimaram combustíveis fósseis. Estes combustíveis fósseis foram extraídos abaixo da superfície, onde permaneceram durante milhões de anos, e assim, quando queimados, emitiram uma imensa quantidade de dióxido de carbono (CO₂), um poderoso gás de efeito estufa, na atmosfera. Uma quantidade crescente de CO₂ na atmosfera leva a um efeito estufa mais forte, fazendo com que a temperatura na Terra aumente.

Em 2023, a temperatura média global está cerca de 1,1 °C mais elevada do que era nos tempos pré-industriais.⁸³ Mesmo aumentos aparentemente pequenos como este têm um impacto tremendo no nosso clima. Em comparação, durante a última era glacial, quando metade da Europa estava coberta por um escudo de gelo com quilômetros de espessura, a temperatura média global era apenas 6°C mais baixa do que durante o século XX.⁸⁴ Para limitar as alterações climáticas e mitigar a crise climática que se seguiu, o marco do Acordo de Paris foi assinado em 2015 por quase todas as nações do planeta. O seu objetivo é limitar o aquecimento global abaixo de 2°C, de preferência abaixo de 1,5°C, para manter um clima habitável tal como o conhecemos.⁸⁵

Depois do CO₂ ser emitido para a atmosfera, permanece lá durante centenas de anos, e o aquecimento global é, portanto, resultado das emissões cumulativas ao longo dos últimos séculos. Enquanto emitirmos mais CO₂ do que absorvemos, a temperatura aumentará. Um orçamento de carbono quantifica a quantidade total de emissões de CO₂ que podem ser liberadas na atmosfera enquanto se mantém dentro de um determinado limite de temperatura com uma certa probabilidade. Considera as emissões de diversas fontes, não apenas as emissões resultantes da utilização de combustíveis fósseis na produção de energia, nos transportes, nos edifícios e na indústria, mas também as provenientes do desmatamento, da gestão de resíduos, da alteração do uso do solo e da agricultura.

Em 2023, o Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas (IPCC), um consórcio de cientistas climáticos, calculou que a partir de 2020 não poderemos emitir mais de 500 Gt CO₂ para manter o aquecimento global abaixo de 1,5°C, com 5% de sucesso. Para permanecer abaixo de 2°C com uma probabilidade de 67%, restam 1.150 Gt CO₂.⁸⁶ As emissões globais de CO₂ ascenderam a cerca de 40 Gt em 2022, o que significa que se continuarmos a este ritmo, o orçamento de 1,5°C estará esgotado por volta de 2030.

No entanto, muita coisa mudou desde a assinatura do Acordo de Paris. Atualmente, mais de 80% das emissões globais são compreendidas por anúncios ou compromissos de net zero.⁸⁷ Se for totalmente implementado, o aquecimento global poderá ser limitado a 1,8-1,9 °C. O fato dos países estarem dispostos a comprometer-se com este nível de ambição é motivo de esperança.

Emissões: Evitar as emissões fósseis é a única forma viável de limitar o aquecimento

Nesta comparação, analisamos o Low Emissions Scenario juntamente com o cenário climático Net Zero da IEA do World Energy Outlook 2023, bem como os cenários mais recentes do IPCC consistentes com um aquecimento global de 1,5 e 2 °C. No Low Emissions Scenario, prevê-se que as emissões de CO₂ relacionadas com a energia diminuam quase 70% em relação aos níveis atuais até 2050. Embora esta seja uma redução significativa, fica aquém do necessário para uma trajetória de 1,5°C. Para nos alinharmos com os cenários de 1,5°C, precisamos aumentar as energias renováveis e a produção de energia. Além disso, é necessário um aumento substancial do hidrogênio e da Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) para eliminar as últimas e mais dispendiosas moléculas de CO₂.

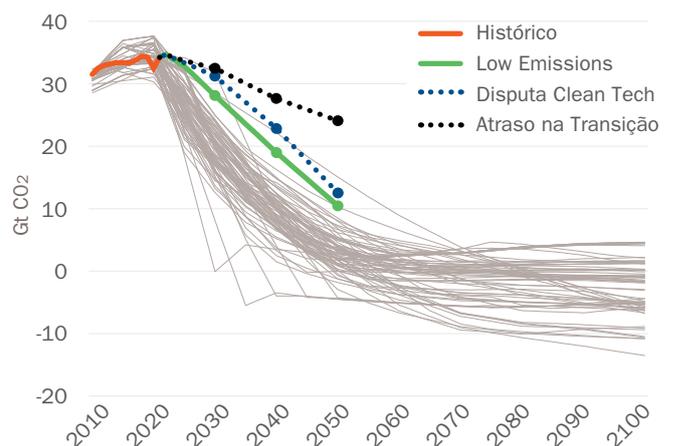
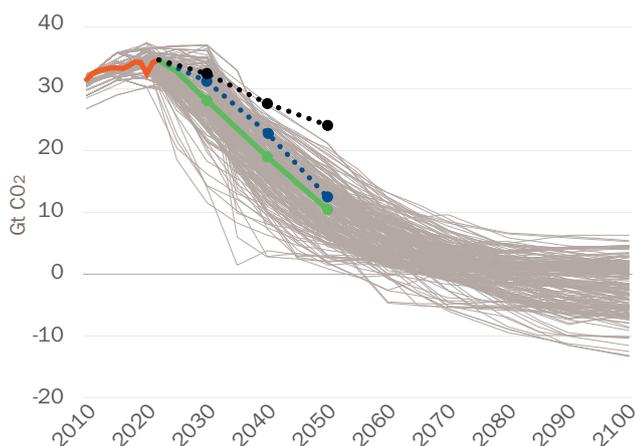
No Relatório do Low Emissions Scenario, consideramos as emissões de CO₂ relacionadas com a energia, até 2050, que são responsáveis pela maioria de todas as emissões de CO₂. Essas emissões resultam principalmente da combustão de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural para eletricidade e outra energia útil.

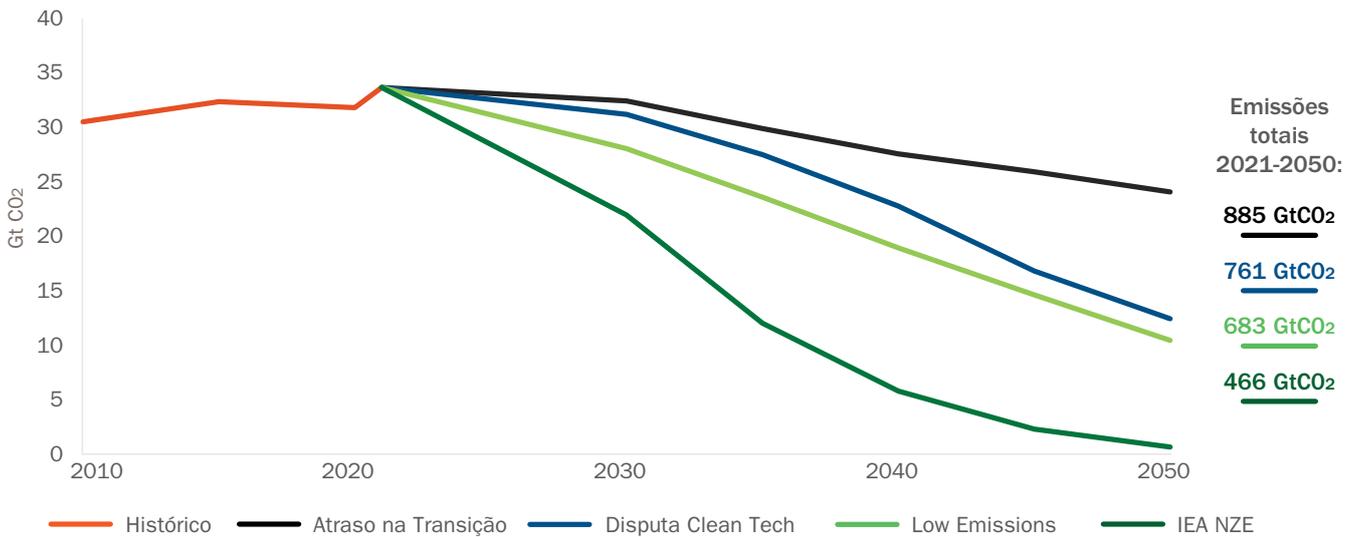
No **Low Emissions Scenario**, as emissões globais de CO₂ relacionadas com a energia cairão quase 70% entre 2023 e 2050, e acabaremos com uma emissão anual de cerca de 10,5 Gt CO₂ em 2050. Isto significa que as emissões de CO₂ relacionadas com a energia no Low Emissions Scenario podem estar alinhadas com o caminho dos 2°C do IPCC se as emissões forem rapidamente reduzidas a

zero após 2050 (Figure 34). Mesmo assim, a redução das emissões ainda não será suficientemente rápida para atingir uma trajetória de 1,5°C.

Embora a redução de emissões no cenário de **CDisputa Clean Tech** quase alcance o Low Emissions Scenario em 2050, as emissões cumulativas são cerca de 80 Gt superiores, levando a um maior aquecimento global. Isso exigiria mais emissões líquidas negativas pós-2050 para atingir o mesmo nível de aquecimento global. A trajetória de emissões no cenário de **Atraso na Transição** corresponde a um aquecimento global de cerca de 2,4 °C em 2100, em comparação com os tempos pré-industriais.

34 Emissões nos Cenários vs IPCC 2°C (esquerda) e IPCC 1,5°C (direita)⁸⁸





A última milha para net zero

De acordo com o IPCC, as emissões globais de CO₂ devem ser reduzidas para net zero até 2050 para limitar o aquecimento global a 2°C ou mesmo 1,5°C. Para atingir net zero, as emissões restantes devem ser compensadas por emissões negativas, ou seja, remoção de carbono. Neste contexto, é prudente comparar o Low Emissions Scenario com um cenário de “net zero até 2050”. O Low Emissions Scenario pressupõe que as políticas, as tecnologias e os mercados se reforçam mutuamente até 2050, para ganharem um forte impulso de transição energética. Os cenários de net zero, por outro lado, são muitas vezes cenários do tipo “o que é preciso?”. Um cenário de net zero normalmente adota uma perspectiva de backcasting e estabelece um caminho para atingir uma meta de emissão net zero em um determinado ano. No capítulo seguinte, comparamos o Low Emissions Scenario com o cenário “Emissões Net Zero até 2050” (NZE) publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA) no seu World Energy Outlook 2023.⁸⁹

PRECISAMOS DE MAIS DE TUDO E MAIS RÁPIDO

No **Low Emissions Scenario**, as emissões globais de CO₂ diminuem de forma constante, com 10,5 Gt CO₂ residuais de emissões anuais em 2050, produzindo emissões cumulativas relacionadas com a energia de 683 Gt CO₂ no período 2021-2050. Neste ritmo, net zero só será alcançado após 2060, com emissões cumulativas de cerca de 750 Gt CO₂. Embora as estimativas do orçamento de carbono sejam incertas, os níveis de emissões cumulativas implicam provavelmente um aquecimento global superior a 1,5°C, mas provavelmente próximo ou inferior a 2°C. Para que o Low Emissions Scenario seja compatível com uma trajetória de 1,5 a 2°C, como o cenário de Emissões Net Zero até 2050 da IEA, as emissões relacionadas com a energia precisam de ser reduzidas para metade até 2035 e acumuladas para menos de 500 Gt CO₂ no período 2020-2050.

Tal como a IEA salienta no seu cenário, as ferramentas para um mundo com emissões net zero até 2050 estão todas disponíveis, mas precisam ser utilizadas a um ritmo

e a uma escala sem precedentes. É necessário eliminar os subsídios favoráveis aos combustíveis fósseis, construir mais energia eólica e solar mais rapidamente, reforçar a rede elétrica, aumentar a produção de hidrogênio e há também tecnologias que estão atualmente em fase de demonstração e que devem ser implementadas em grande escala antes de 2050. Também precisamos usar a energia de forma mais eficientes.

Além disso, uma vez que a redução de algumas emissões é muito dispendiosa, praticamente todos os cenários de 1,5°C incluem emissões líquidas negativas de CO₂ até 2050 e mais além, como as provenientes do florestamento, da bioenergia com CCUS e de tecnologias de remoção de dióxido de carbono.

Em comparação com o Low Emissions Scenario, as reduções de emissões ficam atrasadas no cenário de **Disputa Clean Tech**, resultando em emissões mais elevadas de quase 80 Gt CO₂ no período 2021-2050, e terminando em emissões mais elevadas de CO₂ de 2 Gt em 2050. Neste cenário, a regionalização das cadeias de suprimentos atrasa a implantação em grande escala de tecnologias críticas e, portanto, a redução de CO₂ também é atrasada. Este atraso leva a emissões cumulativas mais elevadas, mas ainda pode ser suficiente para limitar o aquecimento global a menos de 2°C.

No cenário de Atraso na Transição, contudo, as emissões globais de CO₂ não serão reduzidas nem sequer para metade até 2050 e o limiar de 2°C até 2100 será inevitavelmente ultrapassado neste cenário.

MAIS ENERGIA RENOVÁVEL É NECESSÁRIA PARA NET ZERO

A eletrificação é fundamental para substituir o uso atual de combustíveis fósseis, levando a um aumento na geração de energia elétrica. Tanto o Low Emissions Scenario como o cenário de Disputa Clean Tech seguem de perto o cenário Net Zero da IEA em termos de geração de energia, mas nem a velocidade até 2030 nem o nível em 2050 são suficientemente elevados para estarem em conformidade com a NZE da IEA em qualquer um dos cenários. No **Low Emissions Scenario**, a energia elétrica gerada

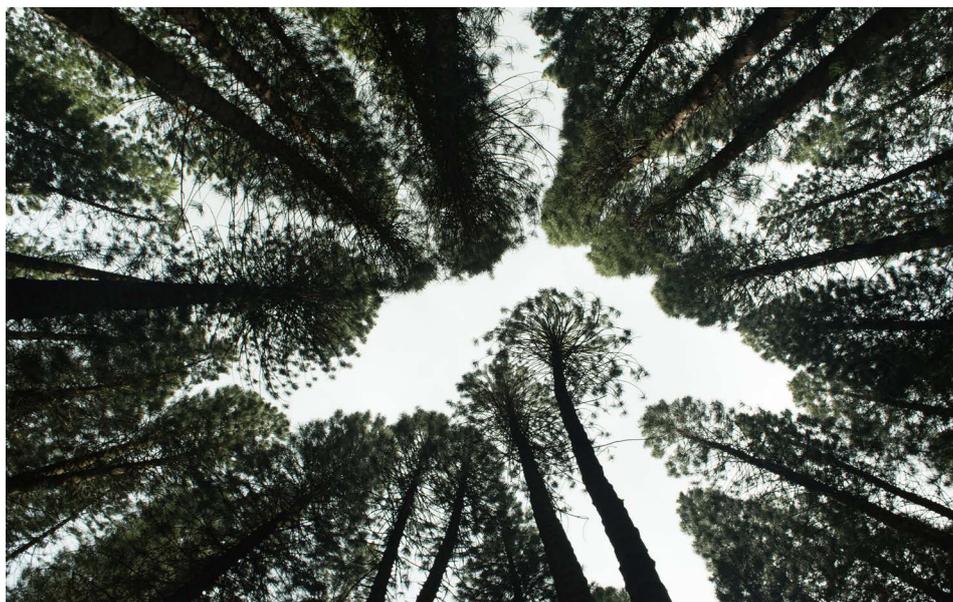
FACT BOX

Remoção de carbono

As tecnologias de remoção de carbono visam remover o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera para ajudar a mitigar as alterações climáticas. Na medida em que o mundo enfrenta o desafio de reduzir as emissões de gases de efeito estufa para limitar o aquecimento global, estas tecnologias oferecem soluções potenciais para compensar as emissões existentes e atingir o objetivo de atingir emissões net zero ou mesmo negativas. Existem três tipos principais de tecnologias de remoção de carbono:

1. **Florestamento e Reflorestamento:** Plantar árvores (florestamento) ou restaurar florestas degradadas (reflorestamento) pode capturar e armazenar quantidades significativas de CO₂.
2. **Captura Aérea Direta (DAC):** DAC envolve o uso de equipamentos ou produtos químicos especializados para capturar diretamente o CO₂ do ar ambiente. O CO₂ capturado pode então ser armazenado no subsolo ou usado em diversas aplicações, como recuperação avançada de petróleo ou produção de combustíveis sintéticos.
3. **Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS):** BECCS combina a produção de bioenergia, como a queima de biomassa para obtenção de eletricidade, com a captura e armazenamento de carbono. O CO₂ emitido durante a produção de bioenergia é capturado e armazenado no subsolo, removendo efetivamente o CO₂ da atmosfera.

Embora as tecnologias de remoção de carbono sejam promissoras, há desafios a considerar. Estas incluem a necessidade de implantação em grande escala, viabilidade técnica, eficiência de custo, preocupações ambientais e éticas e potenciais compromissos relacionados com a utilização da terra para a produção de alimentos ou a conservação da biodiversidade.

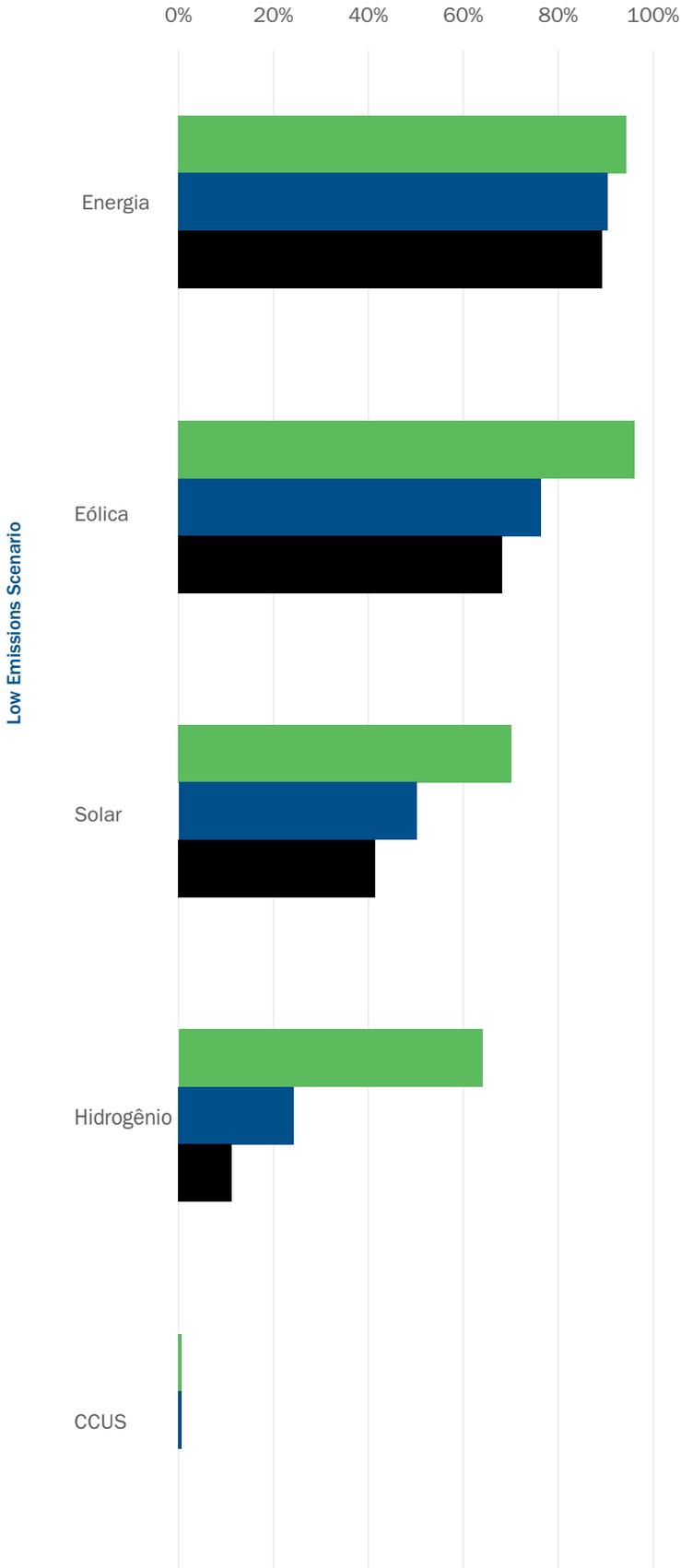


↑ Florestamento e Reflorestamento: Plantar árvores (florestamento) ou restaurar florestas degradadas (reflorestamento) pode capturar e armazenar quantidades significativas de CO₂.

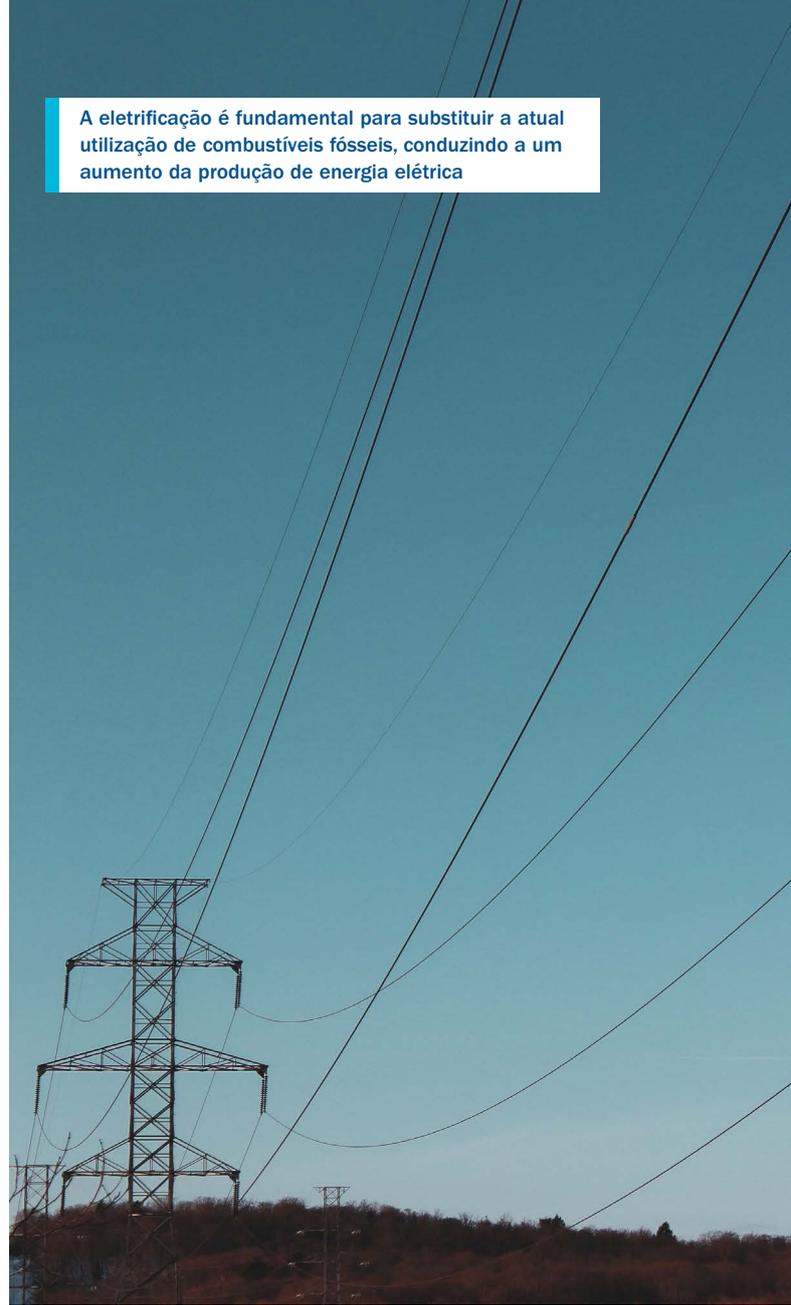
36 Produção de energia (total, eólica, solar), produção de hidrogênio e utilização de CCUS nos cenários comparados com o cenário NZE da IEA em porcentagens de volumes NZE (%) em 2030.

2030

● Low Emissions ● Disputa Clean Tech ● Atraso na Transição



A eletrificação é fundamental para substituir a atual utilização de combustíveis fósseis, conduzindo a um aumento da produção de energia elétrica



a partir da energia solar é ligeiramente superior à energia eólica em 2050, com 22.000 TWh e 20.600 TWh, respectivamente. O Cenário Net Zero da IEA, por outro lado, tem um peso maior em termos de produção de energia eólica (31.200 TWh) em comparação com a solar (23.400 TWh).

De qualquer forma, o **Low Emissions Scenario** apresenta uma expansão um pouco mais lenta de energia renovável em comparação com um Cenário Net Zero da IEA, especialmente no que diz respeito à energia solar. Muito aquém de triplicar a capacidade renovável até 2030. A **Disputa Clean Tech** prevê uma implementação substancialmente mais lenta da energia eólica e solar até 2030, mas entre 2030 e 2050, a geração eólica e solar crescerá a um ritmo semelhante ao do Low Emissions Scenario. No cenário de **Atraso na Transição**, a geração eólica e solar em 2050 é inferior a 40% por cento da geração correspondente no Cenário Net Zero da IEA.

HIDROGÊNIO E CCUS SÃO NECESSÁRIOS EM SETORES DIFÍCEIS DE REDUZIR

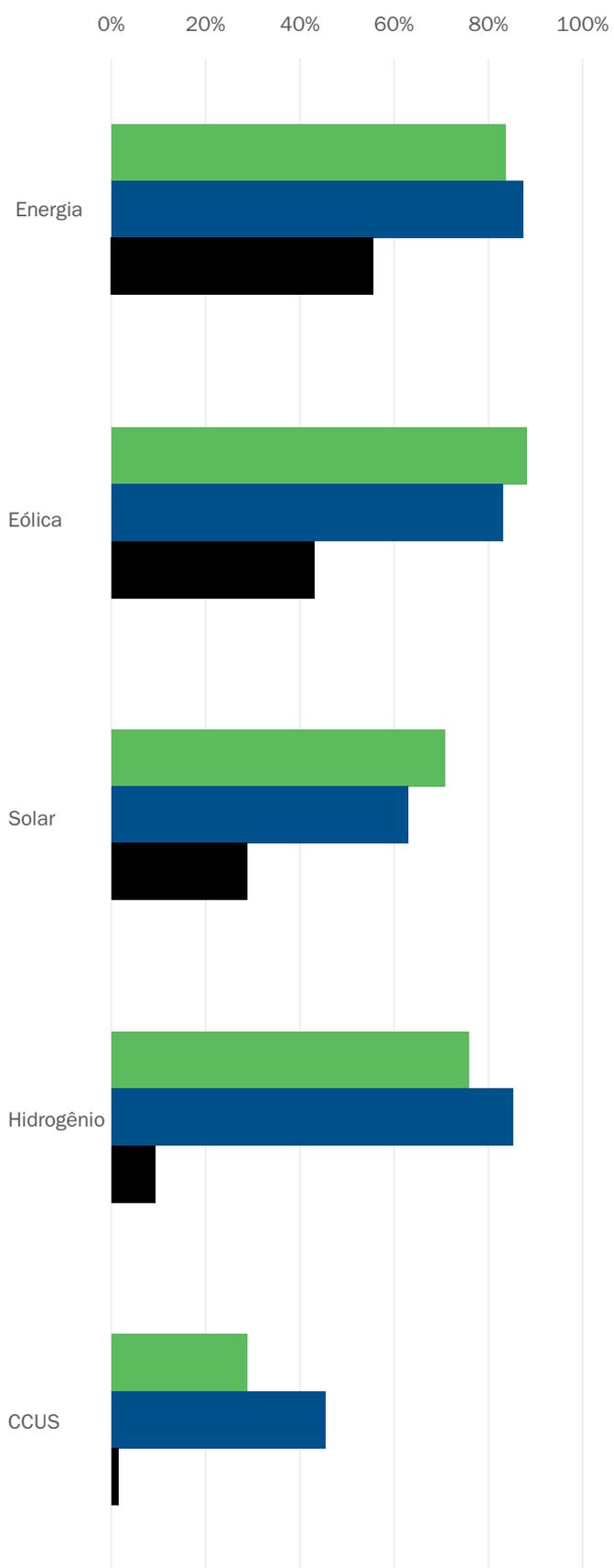
É normalmente a molécula de CO₂ mais cara que resta no Low Emissions Scenario. Tal como descrito acima, o hidrogênio limpo pode ser fundamental para a descarbonização de setores difíceis de reduzir, como a



37 : Produção de energia (total, eólica, solar), produção de hidrogênio e utilização de CCUS nos cenários comparados com o cenário NZE da IEA em porcentagens de volumes NZE (%) em 2050.

2050

● Low Emissions ● Disputa Clean Tech ● Atraso na Transição



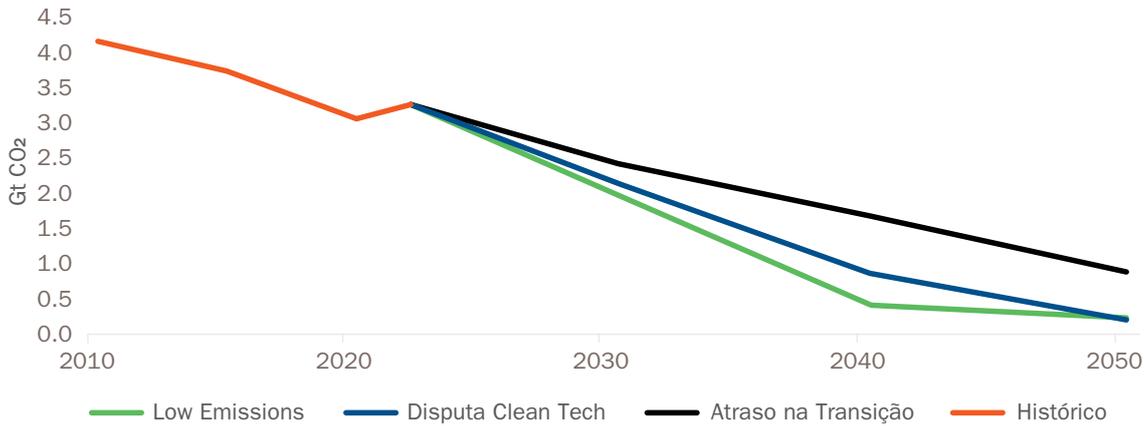
2023

indústria de alta temperatura ou os transportes de longa distância. Para o hidrogênio limpo, o Low Emissions Scenario e o cenário de Disputa Clean Tech são substancialmente menos otimistas do que o cenário NZE da AIE. A implantação de hidrogênio até 2030 no Low Emissions Scenario está apenas ligeiramente acima de 60% dos níveis exigidos na IEA NZE e, em 2050, o Low Emissions Scenario prevê cerca de 30% menos na demanda de hidrogênio limpo.

No **Low Emissions Scenario**, as tecnologias de CCUS só são implementadas na década de 2030 e, devido aos elevados custos, capturam menos de 2 Gt CO₂ anualmente em 2050. Menos de 35% do que é necessário na AIE NZE (Figura 37).

O cenário de **Disputa Clean Tech** prevê mais CCUS até 2050 do que no Low Emissions Scenario, mas ainda longe dos níveis da IEA NZE. Para limitar o aquecimento global a 2°C até 2100, o Low Emissions Scenario e os cenários de Disputa Clean Tech e de NZE dependem de tecnologias de remoção de carbono pós-2050.

A utilização de hidrogênio e CCUS é quase insignificante no cenário de **Atraso na Transição**.



Uma análise aprofundada (deep dive) na transição de energia europeia

A Europa tem estado na vanguarda dos esforços para mitigar as alterações climáticas. Em resposta à recente crise energética e ao aumento dos preços da energia, a UE estabeleceu metas ambiciosas para a transição energética até 2030 e mais além. Semelhante ao ano passado, o relatório **Low Emissions Scenario** da Statkraft fornece uma análise aprofundada dos cenários potenciais para a transição energética da Europa em direção a 2050.

A Europa assume-se como aquela com melhor desempenho global na transição energética, tendo adotado metas ambiciosas de redução de emissões, combinadas com uma nova regulamentação através do **European Green Deal**ⁱ, **Fit-for-55 package**ⁱⁱ e **REPowerEU**. Além disso, a UE facilita a cooperação regional e implementa uma gama diversificada de instrumentos políticos eficazes e inovadores, como a tarifação do carbono e o Mecanismo de Ajuste das Fronteiras de Carbono (CBAM).ⁱⁱⁱ Estas políticas da UE visam acelerar a transição ecológica e garantir a segurança energética, reforçando simultaneamente a posição econômica e o crescimento económico da UE. Até agora, a crise energética apenas acelerou a transição energética na Europa.

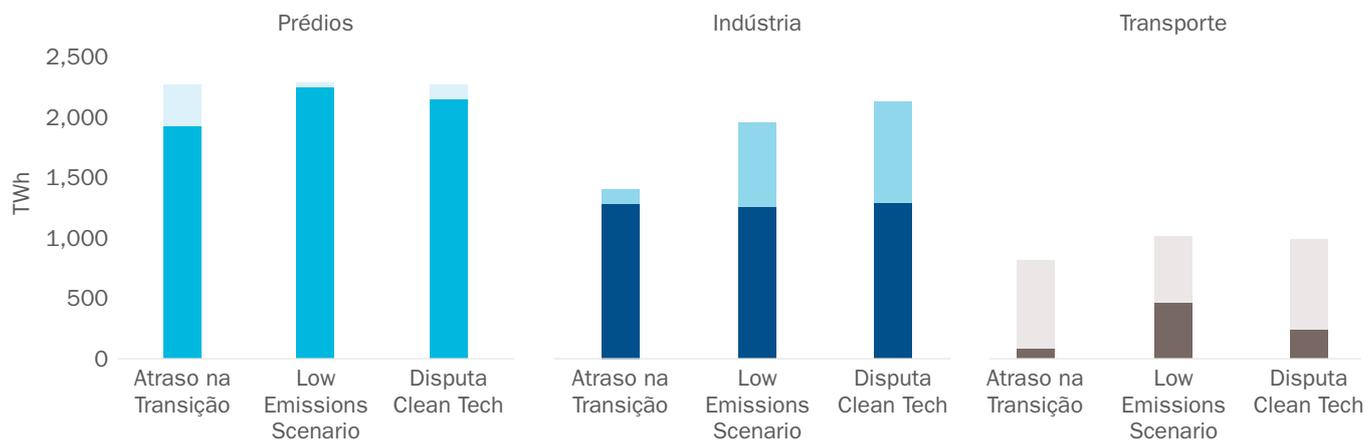
Ao mesmo tempo, a guerra na Ucrânia está testando a unidade europeia. A crise energética e as perturbações na cadeia de suprimentos afetam a economia da região devido ao aumento dos preços da energia e contribuem para o aumento da inflação. Neste contexto, os países podem potencialmente concentrar-se mais na defesa nacional, na segurança energética e na proteção das indústrias nacionais.

Além disso, a transição energética europeia está, neste momento, fortemente dependente dos mercados globais, especialmente para o fornecimento de matérias-primas essenciais necessárias para esta transição. O aumento da tensão geopolítica poderá, portanto, afetar as ambições climáticas da Europa, num momento em que o acesso a matérias-primas críticas é visto como um ativo estratégico. Embora a Lei Europeia das Matérias-Primas Críticas e a Lei da Indústria Net Zero sinalizem o compromisso da Europa em desenvolver cadeias de suprimentos autônomas, esta

procura poderá inflacionar os custos e, no cenário mais desafiador, adiar a consecução das ambiciosas metas de transição da região.

A trajetória de transição energética da Europa está significativamente exposta à tensão geopolítica e varia significativamente nos nossos três cenários:

- **No Low Emissions Scenario**, a liderança da Europa na transição energética torna-se mais pronunciada. As metas ambiciosas da região, os esforços regionais de colaboração, os instrumentos políticos inovadores e diversos, como a tarifação do carbono e o Mecanismo de Ajustamento das Fronteiras do Carbono (CBAM), bem como os subsídios bem colocados, alinham-se com este caminho. O compromisso com a eficiência, as energias renováveis e a redução das emissões mantém-se firme, impulsionando a transição. A UE atinge o seu objetivo de independência do gás russo. No entanto, a dependência da Europa dos mercados globais para matérias-primas críticas continua a ser uma vulnerabilidade, ressaltando a necessidade de cadeias de suprimentos resilientes, uma vez que as perturbações podem afetar a progressão harmoniosa da transição.
- O cenário de **Disputa Clean Tech** traz oportunidades e desafios para a Europa. Embora a região se envolva numa corrida competitiva para estabelecer indústrias e cadeias de suprimentos limpas, a complexa tarefa de descarbonizar as indústrias existentes e, ao mesmo tempo, manter a competitividade sem o gás russo surge como uma preocupação principal. A corrida global aos subsídios força a Europa a uma transição energética baseada em subsídios, com o



preço do carbono ficando em segundo plano, levando a uma transição menos eficiente e mais dispendiosa. O acesso limitado a componentes críticos das cadeias de suprimentos de tecnologias de energias renováveis faz com que as metas de emissões a curto prazo não sejam alcançadas. Neste cenário, alguns países adotam metas nucleares ambiciosas para abordar questões de segurança energética e de segurança nacional.

- O cenário de **Atraso na Transição** coloca desafios distintos para a Europa. À medida em que aumentam as tensões geopolíticas globais e regionais, as políticas protecionistas e as preocupações econômicas, a mitigação climática é menosprezada. A atenção política é, em vez disso, direcionada para a mitigação do aumento do custo de vida, para a segurança nacional e para a proteção das indústrias essenciais, levando a atrasos na descarbonização. A manutenção do papel histórico da Europa como líder climática enfrenta obstáculos neste cenário.

Embora as características de cada cenário apresentem vários desafios, a liderança da Europa em matéria de sustentabilidade e a sua capacidade de adaptação às novas circunstâncias serão essenciais para moldar a trajetória da transição energética na região, bem como a nível mundial.

Nas nossas análises de modelo, executamos os vários cenários do nosso modelo de sistema energético europeu para^{iv} quantificar a forma como as diferentes vias de emissão afetarão a solução otimizada em termos de custo para a transição europeia entre setores. As análises focam nas emissões de CO₂ relacionadas com a energia.

- Para o **Low Emissions Scenario**, assumimos que a UE atinge as suas metas de emissões para 2030 e 2050, que consistem em reduzir as emissões **em 55% em 2030** em comparação com o nível de 1990, e atingir o **net zero em 2050**. Para 2040, adotamos uma meta mais ambiciosa de **90/95%**, em linha com “Aconselhamento científico para a determinação de uma meta climática ampla da UE para 2040 e de um orçamento de gases de efeito estufa para 2030–2050”.⁹⁰
- Para o cenário da **Disputa Clean Tech**, assumimos que a UE não atinge as suas metas para 2030, uma vez que a região luta com cadeias de suprimentos e comércio insuficientes de tecnologias renováveis. A UE só consegue reduzir as emissões **em 45% até**

2030, mas a transição acelera em direção a **2050 com a meta de net zero alcançada**.

- Para **Atraso na Transição**, as emissões serão reduzidas apenas em **35% até 2050** e **em 80 por cento até 2050**.

A eletrificação nos setores de utilização final é fundamental para alcançar as metas climáticas da UE

A ferramenta mais eficiente em custo para reduzir as emissões nos setores de utilização final é a eletrificação, e tecnologias maduras, como as bombas de calor e os veículos elétricos são fundamentais para que a UE alcance as suas ambições climáticas, especialmente até 2030.

No **Low Emissions Scenario**, o desenvolvimento tecnológico, os mercados e as políticas trabalham em conjunto, e as metas da UE para 2030 são alcançadas através da implantação de bombas de calor, bem como de veículos elétricos, eletrificação de aquecimento e da garantia de energia limpa para os transportes. O crescimento anual das bombas de calor está muito acima das metas REPower EU, com 42 milhões de novas bombas de calor até 2030, realçando a eficiência na redução de emissões com bombas de calor (Figura 40). A eletrificação da indústria é mais gradual, à medida que instalações de capital intensivo e com longa vida útil são eventualmente eletrificadas. A rápida eletrificação ocorre paralelamente ao crescimento substancial da energia eólica e solar.

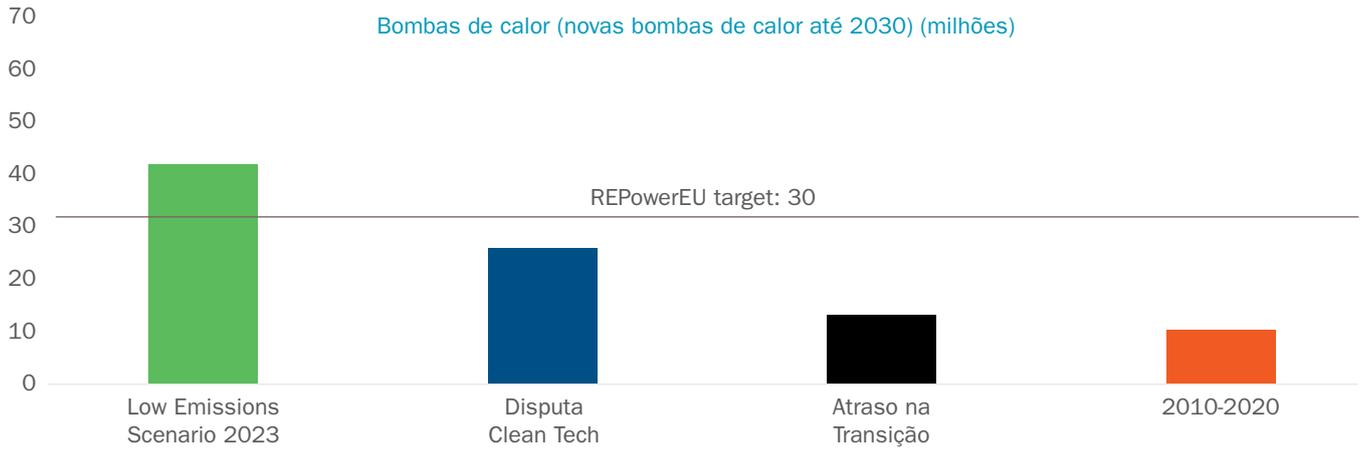
ⁱ O Pacto Ecológico Europeu é o plano da UE para se tornar neutra em termos climáticos até 2050. Abrange setores como o clima, a energia, os transportes e muito mais. O objetivo é reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 55% até 2030. É também visto como uma forma de recuperar da pandemia da COVID-19.

ⁱⁱ O pacote “Fit for 55” consiste em doze propostas legislativas, dois terços das quais são atualizações ou revisões da legislação existente, abrangendo o sistema de comércio de licenças de emissão da UE (ETS), estatísticas dos membros, metas de redução de emissões para setores não abrangidos pelo ETS, setor dos transportes, eficiência energética, energias renováveis, emissões provenientes do uso do solo, um fundo social para o clima, tributação da energia e um Mecanismo de Ajuste de Carbono nas Fronteiras (CBAM).

ⁱⁱⁱ O Mecanismo de Ajustamento de Carbono nas Fronteiras (CBAM) faz parte do plano climático da UE para evitar a “fuga de carbono”. Aplica um preço do carbono a certos bens que entram na UE, incentivando uma produção global mais limpa. Os importadores devem comprar “certificados CBAM” para as emissões dos seus produtos, alinhando o preço do carbono das importações com a produção nacional. O CBAM iniciou sua fase de transição em 1º de outubro de 2023.

^{iv} Ver o Anexo 3 para descrição do modelo

40 Novas bombas de calor até 2030 (milhões) na Europa, em comparação com o Low Emissions Scenario 2022 e a meta REPower EU



Na **Disputa Clean Tech**, a eletrificação abranda e o crescimento dos veículos elétricos e das bombas de calor até 2030 é 50% e 40% inferior ao Low Emissions Scenario, respetivamente. Contudo, o crescimento da procura de eletricidade proveniente dos transportes acelera na década de 2040 para um crescimento anual de 14%, e a eletrificação do setor de edificações alcança o Low Emissions Scenario em 2040. Em **Atraso na Transição**, a eletrificação dos edifícios e dos transportes é muito mais lenta e não alcança os outros cenários até 2050.

Hidrogênio é essencial em setores difíceis de reduzir

A eletrólise para produzir hidrogênio não é uma tecnologia totalmente madura. Além disso, a demanda de hidrogênio exige que mais desenvolvimento tecnológico esteja disponível em grande escala. É necessário um impulso político para o desenvolvimento da tecnologia de eletrolisadores e da infraestrutura de hidrogênio, juntamente com custos reduzidos e acesso à energia limpa. Estes desafios remanescentes resultam em diferenças significativas entre os cenários para a implantação do hidrogênio limpo.

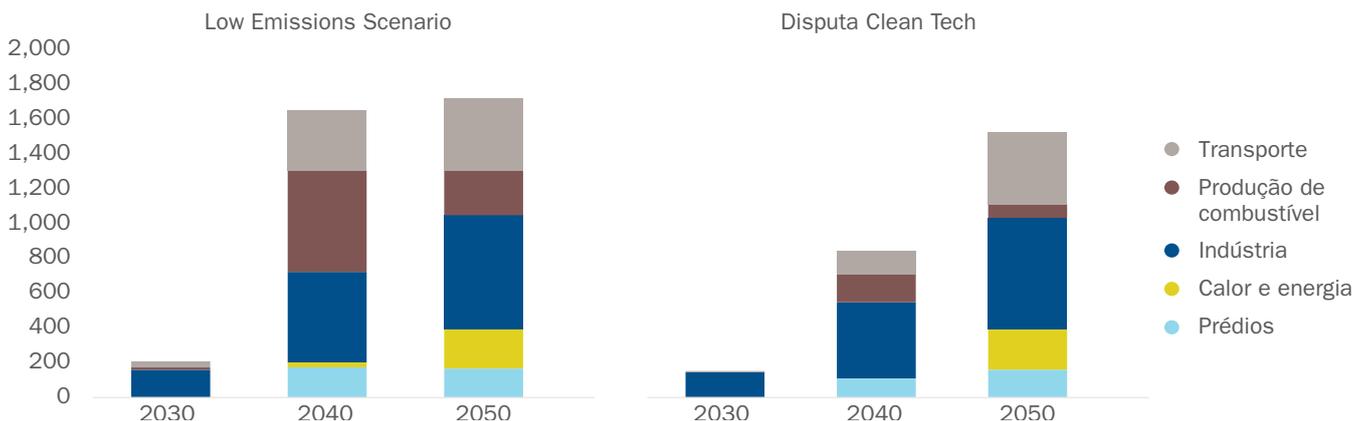
No cenário de **Atraso na Transição**, a demanda de energia proveniente da produção de hidrogênio é baixa,

enquanto a produção de hidrogênio representa uma parte significativa do consumo de energia para o **Low Emissions Scenario** e o **cenário de Disputa Clean Tech** até 2050, com 22% e 19,5% provenientes da produção de hidrogênio, respectivamente. (Figura 40).

No **Low Emissions Scenario**, as emissões serão reduzidas em 90/95% já em 2040. Este ritmo de redução de emissões exige um rápido desenvolvimento de hidrogênio limpo, e o cenário prevê uma taxa de crescimento anual de 23% a ser alcançada na década de 2030. Aqui, o hidrogênio verde substitui a utilização atual do hidrogênio cinza e é utilizado para a produção de combustível sintético e usado diretamente para reduzir as emissões residuais nos setores de transporte e da indústria. O hidrogênio é também, em certa medida, utilizado para aquecer edifícios e para flexibilidade no setor energético.

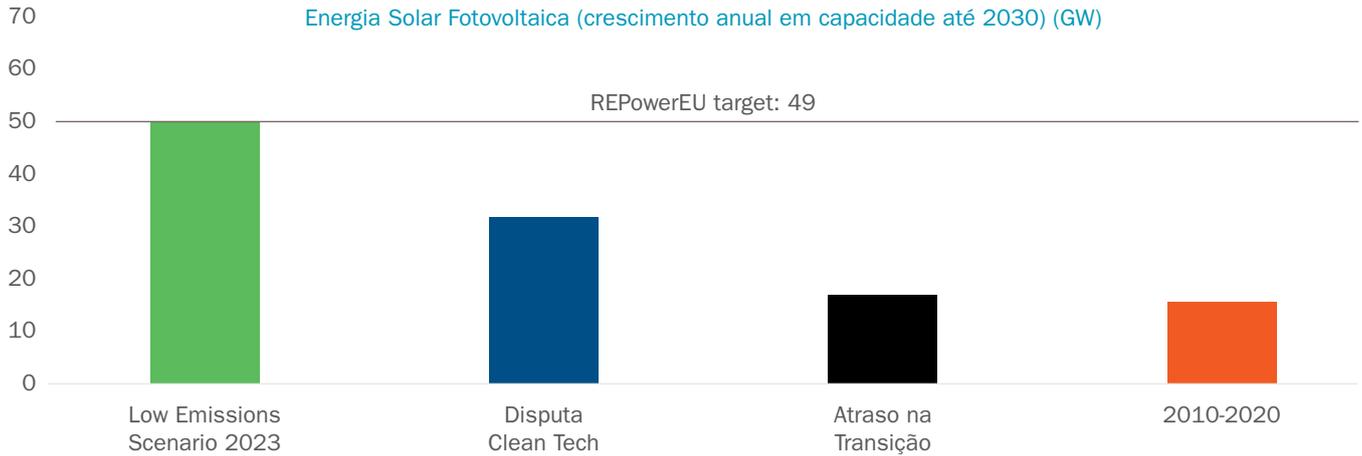
No cenário **Disputa Clean Tech**, em que as emissões alvo para 2040 não são cumpridas, o crescimento da demanda de hidrogênio é mais gradual, e o hidrogênio é utilizado principalmente diretamente para aquecimento no setor industrial, ou diretamente como combustível nos transportes. Isto reduz as emissões ao longo do tempo até 2050, em vez de atingir as metas mais imediatas para 2040.

41 Demanda de hidrogênio por sector no Low Emissions Scenario e Corrida Espacial (TWh) para a Europa



A Europa é pioneira mundial na transição energética, tendo adotado metas ambiciosas de redução de emissões e associado esses objetivos à política através do Pacto Ecológico Europeu, do pacote Fit-for-55 e do RePower EU





Energia eólica e solar podem ultrapassar 75% em participação de mercado até 2050

Tal como na análise global, a energia solar fotovoltaica e a energia eólica surgem como tecnologias vencedoras em todos os cenários. A energia solar fotovoltaica é de baixo custo, requer prazos de entrega curtos e é relativamente flexível em termos de localização. No Low Emissions Scenario, a implantação da energia solar fotovoltaica atinge a meta REPowerEU de 49 GW por ano a partir de 2021 até 2030. A energia eólica atinge um crescimento de 26 GW por ano até 2030, abaixo da meta RePowerEU de 32 GW por ano (Figura 42).

A energia eólica offshore representa atualmente uma parte menor do mix de eletricidade europeu, mas os objetivos políticos para o crescimento desta tecnologia são enormes (**ver foco Energia Eólica Offshore**). Em nossos cenários, o crescimento da capacidade eólica offshore acelera fortemente após 2030, como resultado de metas ambiciosas de energia eólica offshore, da diminuição dos custos, bem como da expansão das cadeias de suprimentos. As participações relativas da energia eólica e solar diferem entre os países europeus, uma vez que as condições meteorológicas, o potencial de

recursos e os perfis de demanda sazonal variam.

O crescimento das energias renováveis é mais lento na **Disputa Clean Tech** e no **Atraso na Transição** (Figure 43), mas mesmo no cenário menos otimista (Atraso na Transição), a capacidade solar e eólica crescerá quase 250% em relação aos níveis atuais até 2050, atingindo uma participação de mercado de 66%. Em 2050, a Disputa Clean tech atinge níveis comparáveis ao Low Emissions Scenario, com acréscimos de capacidade acelerando para 44 GW and 36 GW por ano, de 2030 a 2040, para capacidade de energia solar e eólica, respectivamente.

A energia renovável assumirá papéis distintos na profunda descarbonização dos países europeus até 2050 (Figura 45). Até 2030, a participação da energia eólica e solar aumenta acentuadamente à medida que essas tecnologias substituem em grande parte a atual geração de energia fóssil. Depois disso, a energia eólica e solar crescem a um ritmo ainda mais rápido, uma vez que a energia renovável também contribui para a substituição do uso de energia fóssil em transporte, edifícios e indústrias por meio de eletrificação direta e indireta. Este é o caso em todos os cenários para graus variados.

Low Emissions Scenario

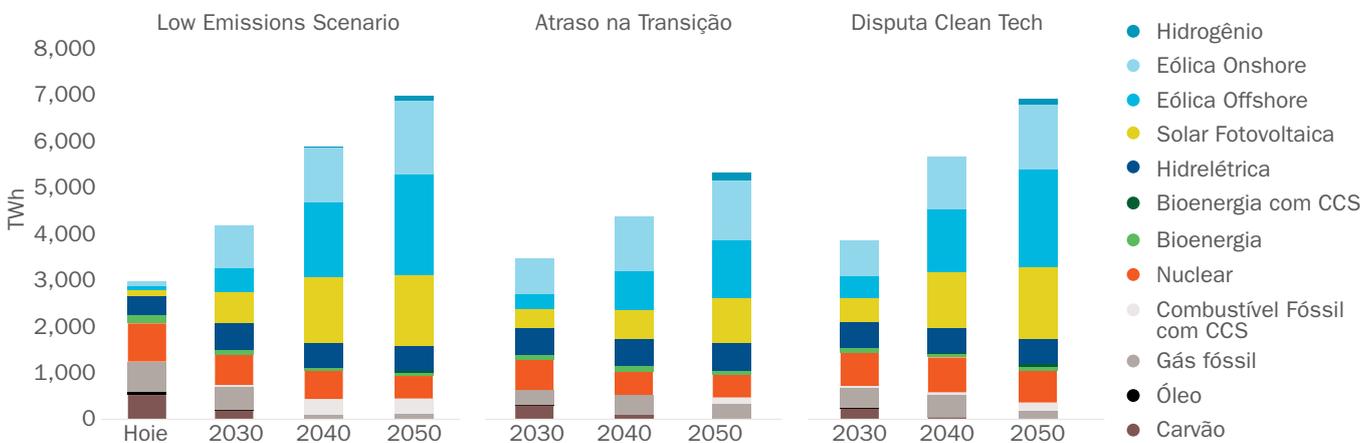


← Mesmo no cenário menos otimista, a capacidade solar e eólica crescerá quase 250% desde o nível atual até 2050 e atingirá uma cota de mercado de 66%

43 Crescimento anual da capacidade de energia eólica 2021-2030 em comparação com as metas REPower da EU

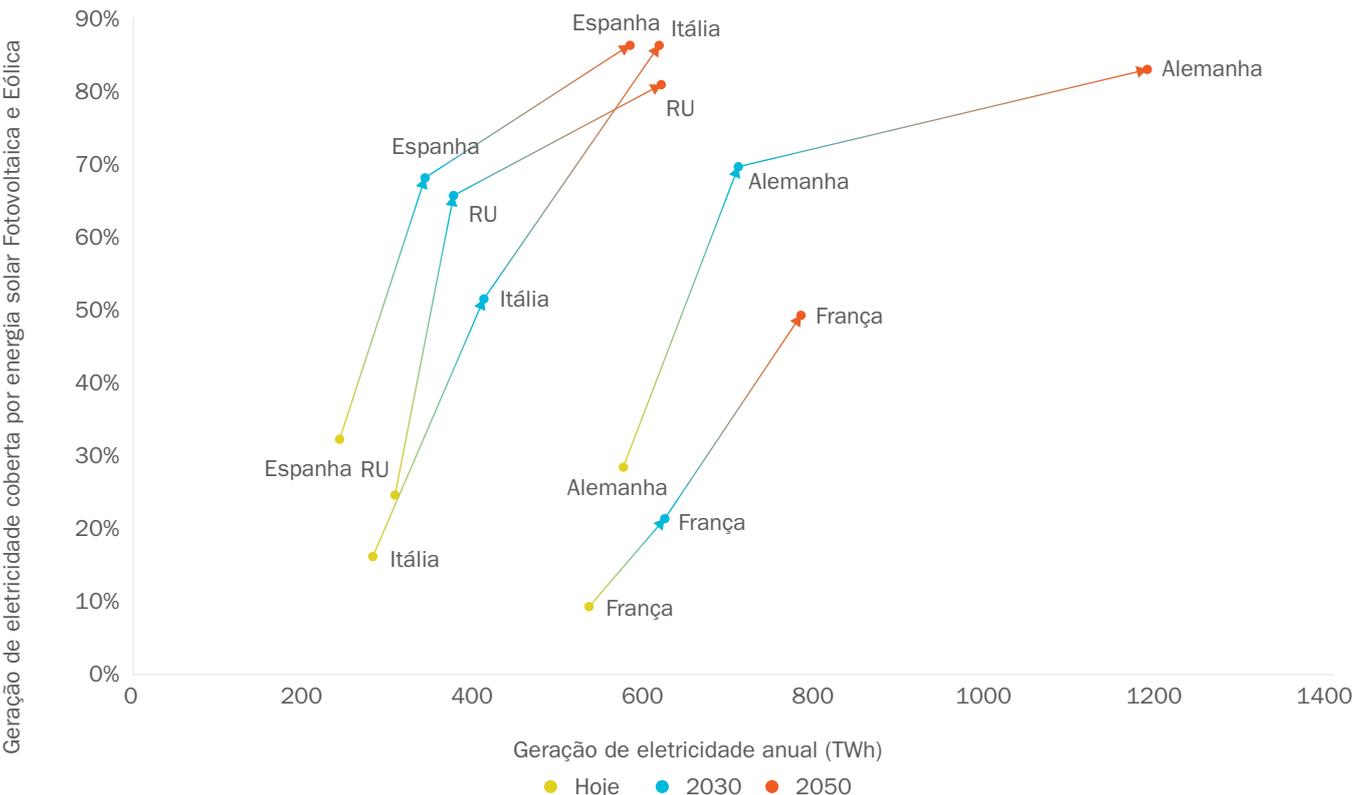


44 Produção de energia por tecnologia de hoje até 2050 (TWh)

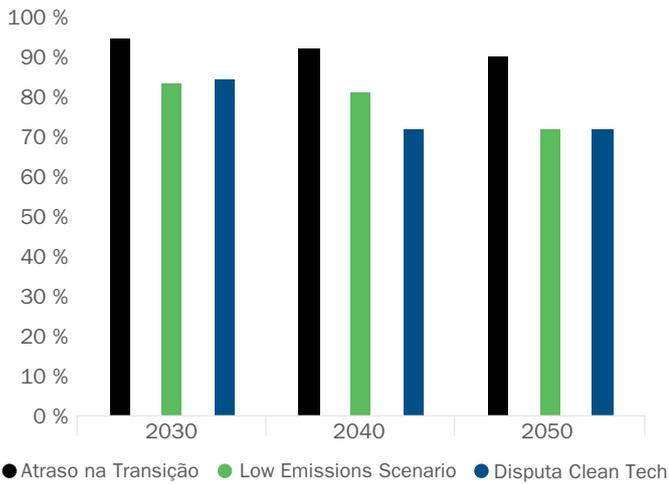


2023

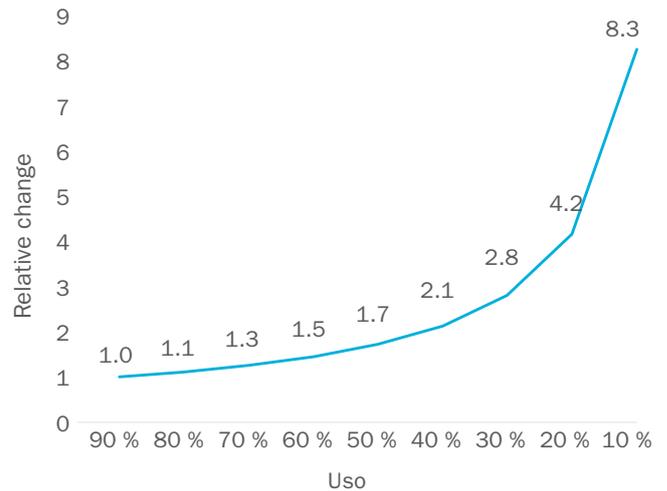
45 Demanda regional de eletricidade nos principais países europeus cobertos por energia solar fotovoltaica e eólica



46 Fator de capacidade para energia nuclear por cenário em 2030, 2040 e 2050



47 Mudança relativa no LCOE com queda no uso de energia nuclear



O papel da energia nuclear ainda é incerto

No **Low Emissions Scenario** e no Atraso na Transição, a expansão de energia nuclear é relativamente baixa, uma vez que os prazos de entrega e os custos são elevados (ver Foco Nuclear). No entanto, se a transição energética europeia tiver de navegar num mundo mais fragmentado, não descartamos um papel mais proeminente para a energia nuclear. Na Disputa Clean Tech, assumimos capacidades crescentes em países que atualmente operam usinas nucleares, capitalizando a sua competência existente para abordar questões de segurança nacional e de segurança energética. Embora esteja sendo construída mais capacidade nuclear, em comparação com outros cenários, o fator de capacidade é significativamente mais baixo – aumentando o custo nivelado da eletricidade (LCOE) (Figuras 45 & 46). Isso é uma consequência de energias renováveis intermitentes de baixo custo com custo marginal zero, superando a energia nuclear durante horas de sol e vento.

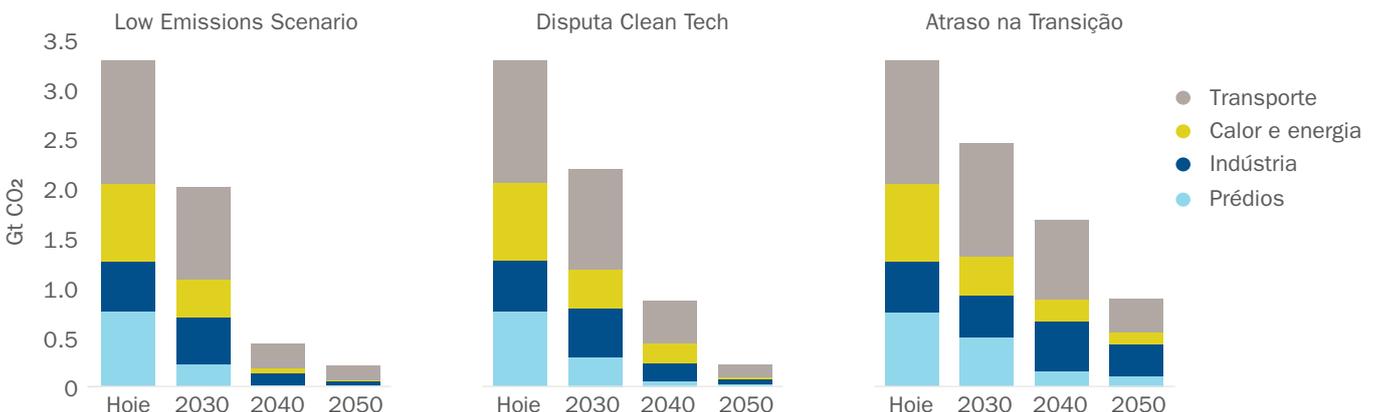
As metas climáticas da UE são desafiantes, mas alcançáveis

O **Low Emissions Scenario** da Statkraft mostra como uma aceleração da expansão de energia limpa e da eletrificação é possível e necessária na União Europeia para atingir as ambiciosas metas de emissões para 2030, 2040 e 2050.

As trajetórias de emissões relacionadas com a energia do modelo do sistema europeu da Statkraft¹ mostram que as emissões europeias continuarão a diminuir até 2050 em todos os cenários, mas a velocidade das reduções de emissões irá variar.

No **Low Emissions Scenario**, as metas para 2030 de redução de 55% nas emissões de CO₂ são alcançadas através da implantação de bombas de calor, bem como de veículos elétricos, e da eletrificação de edifícios e transportes com energia limpa. As medidas de eficiência energética nos edifícios e na indústria reduzem a demanda de energia, resultando em menos eletricidade necessária para descarbonizar os setores de utilização final. Para alcançar as ambiciosas metas para 2040, são necessárias quantidades consideráveis de hidrogênio, especialmente para descarbonizar setores difíceis de reduzir, como a

47 Mudança relativa no LCOE com queda no uso de energia nuclear



Embora mais capacidade nuclear esteja sendo construída, em comparação com outros cenários, o fator de capacidade é significativamente mais baixo – aumentando o custo nivelado da eletricidade



2023

indústria e os transportes. O hidrogênio, juntamente com o gás fóssil (com CCS) e as baterias, surgem como as tecnologias-chave para a flexibilidade no setor energético.

Na **Disputa Clean Tech**, as metas de emissões para 2030 e 2040 estão fora de alcance, atingindo apenas 45 e 80 por cento de redução em 2030 e 2040, respectivamente. Este é o caso apesar das reduções de emissões acelerarem em direção a 2040, à medida que a cadeia de valor da energia limpa atinge capacidade suficiente, reduzindo rapidamente as emissões de energia, aquecimento e veículos de passageiros. Em 2050, a procura de hidrogênio aumentará, principalmente por parte da indústria e dos transportes, como forma de reduzir as emissões de setores difíceis de reduzir.

As emissões são significativamente reduzidas mesmo no Atraso na Transição (35% e 80% em 2030 e 2050, respectivamente). Aqui, as reduções de emissões são atribuídas principalmente à substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis no setor energético, enquanto a eletrificação do uso final tem um ritmo mais lento e menor magnitude. O protecionismo e a desglobalização levam a uma indústria com maior utilização intensiva de energia na Europa, e a falta de uma política climática também deixa quantidades substanciais de emissões nos setores difíceis de reduzir.

ⁱ Veja Anexo 3 para descrição de modelo

Setores	Low Emissions Scenario 2022 da Statkraft	IEA STEPS (2022)	IEA Net zero (2022)	BNEF NEO (2021) NZS
Crescimento anual in demanda de energia primária 2021-50	-0,43 %	0,52 %	-0,49 %	-0,20 %
Setor de Energia				
Demanda	2,88 %	2,24 %	3,50 %	3,79 %
Energia Eólica	8,62 %	6,56 %	9,12 %	11,06 %
Energia Solar	11,24 %	10,2 %	12,51 %	11,34 %
Hidrelétrica	1,76 %	1,35 %	2,26 %	0,28 %
Participação de combustível fóssil não reduzido no setor de energia (TWh, 2050)	8,40 %	21,06 %	0,21 %	0,14 %
Energia Primária				
Consumo de petróleo: crescimento anual 2021-50	-2,71 %	0,06 %	-4,96 %	-4,66 %
Consumo de gás: crescimento anual 2021-50	-1,16 %	-0,04 %	-5,10 %	-2,61 %
Consumo de carvão: crescimento anual 2021-50	-4,87 %	-1,71 %	-8,06 %	-3,67 %
Emissões de CO₂ relacionadas a energia Global - (GtCO₂) em 2050	10,5	26,78	0,66	0,08

APÊNDICE 2

Premissas e visão geral das emissões cobertas no Low Emissions Scenario

O Low Emissions Scenario da Statkraft estende as atuais tendências energéticas globais até 2050. O cenário é baseado na expansão de tecnologias conhecidas e nas próprias análises globais e regionais da Statkraft. O cenário não se baseia numa projeção linear das tendências atuais, nem se baseia numa determinada meta climática e realiza uma análise retrospectiva a partir desta.

O Low Emissions Scenario analisa a evolução dos custos das tecnologias conhecidas até 2050, incluindo a produção de energia renovável, baterias, hidrogênio sem emissões, etc. O cenário pressupõe uma queda acentuada e contínua nos custos por MWh e um ritmo acelerado de desenvolvimento até cerca de 2030. Depois, a taxa de declínio dos custos diminui um pouco, primeiro para a energia eólica e depois para a energia solar.

As análises são baseadas em modelos internos, bem como em estudos aprofundados de fontes externas. O Low Emissions Scenario da Statkraft foi preparado pela equipe de análise estratégica da Statkraft em cooperação com especialistas em outras áreas. Mais de 50 funcionários estão envolvidos na análise de mercado na Statkraft.

O cenário combina um modelo de balanço energético global e um modelo de sistema energético europeu com insights de modelos detalhados do mercado de energia nos países onde atuamos. A Statkraft modela detalhadamente os mercados de energia, hora a hora, para os países nórdicos, Europa, Índia e países da América do Sul até 2050.

O ponto de partida para as análises é o crescimento econômico e o crescimento populacional em linha com um consenso de mercado. No Low Emissions Scenario, assumimos que a taxa de crescimento da economia irá recuperar, no entanto, espera-se que a economia global e a procura de energia permaneçam mais baixas durante todo o período, em comparação com as expectativas antes da pandemia da COVID-19 e da guerra. Na Disputa Clean Tech no Atraso na Transição, assumimos um menor crescimento econômico.

QUAIS EMISSÕES SÃO COBERTAS NO LOW EMISSIONS SCENARIO?

As emissões analisadas no Low Emissions Scenario são emissões de CO₂ relacionadas com a energia. Estas são emissões provenientes da combustão de combustíveis (excluindo a incineração de resíduos não renováveis). Outras emissões que não estão incluídas são as emissões difusas (isto é, vazamentos, emissões provenientes do transporte e armazenamento de combustível, etc.) e emissões de processos industriais.

As emissões de processo são emissões provenientes de reações químicas na produção de, por exemplo, produtos químicos, cimento e certos metais. Estas emissões não são provenientes da combustão e, portanto, não podem ser reduzidas através da utilização de eletricidade em vez de combustíveis fósseis. Estes não estão incluídos no Low Emissions Scenario.

As emissões de CO₂ provenientes do uso do solo, da alteração do uso do solo e da silvicultura (LULUCF) também estão excluídas do Low Emissions Scenario.

As emissões são divididas no setor de energia, setor de edifícios, setor de transportes, setor industrial e uma categoria para outros setores:

- **Energia:** emissões de usinas de energia, usinas de aquecimento e usinas combinadas de energia e aquecimento.
- **Edifícios:** Emissões de edifícios residenciais, comerciais e institucionais, bem como de outros edifícios não especificados. Essas emissões incluem, mas não estão limitadas a aquecimento e resfriamento de salas, aquecimento de água, iluminação, aparelhos de cozinha e outros aparelhos.
- **Transporte:** Emissões provenientes do transporte de mercadorias e pessoas dentro de uma área nacional, independentemente do setor. Isso inclui as emissões provenientes dos transportes rodoviários públicos ou ferroviários, do transporte marítimo nacional e do transporte aéreo nacional. As emissões provenientes do transporte de combustíveis através de gasodutos não estão incluídas aqui. As emissões do transporte internacional são apresentadas a nível internacional.
- **Indústria:** Emissões relacionadas com a combustão e produção de calor nas indústrias transformadoras e de construção. As emissões incluem as emissões da produção de ferro e aço, da indústria química e petroquímica, do cimento e da indústria de celulose e papel. As emissões de veículos que não circulam em vias públicas também estão incluídas.
- **Outros setores:** Emissões provenientes do uso não energético e da agricultura, além das emissões provenientes da produção e transformação de combustíveis, ou seja, emissões provenientes, por exemplo, da produção de petróleo e gás, minas de carvão e refinarias de petróleo. «Não energético» refere-se normalmente a combustíveis utilizados para matérias-primas químicas e outros produtos não energéticos. A agricultura implica emissões relacionadas com a energia provenientes da agricultura, silvicultura e pesca.

APÊNDICE 3

Descrição do Modelo ETM

O Modelo de Transição Energética Statkraft (ETM) foi utilizado para analisar as consequências do plano REPowerEU. O ETM é um modelo de otimização técnico-econômica que abrange todo o sistema energético de 29 países/regiões europeus, especialmente adequado para analisar interações complexas entre a oferta e a demanda de energia. O modelo visa fornecer serviços de energia a um custo total mínimo, tomando decisões sobre equipamentos, bem como decisões sobre operação, fornecimento de energia primária e comércio de energia.

APPENDIX 4
Descrição de cenários

Tabela 2 | Descrição do cenário codificada por cores por efeito na transição energética
Azul: efeitos positivos significativos na transição energética; Amarelo: efeitos um tanto negativos; Vermelho: efeitos negativos

	Cenário		
	Low Emissions Scenario	Disputa Clean Tech rumo ao Net Zero	Atraso na Transição
Crescimento econômico	Crescimento econômico global na sequência de ações bem-sucedidas que mitigam o impacto da inflação.	Menos comércio global e mais regionalização levam a um menor crescimento econômico. Alocação de recursos menos eficiente.	Crescimento lento na maioria das regiões, inflação, desemprego elevado e aumento da pobreza no Ocidente.
Política climática	Forte apoio político à transição energética – políticas que fortalecem os mecanismos de mercado.	Forte impulso político para a transição energética (impulsionada por subsídios) como solução tanto para o clima como para a segurança do suprimento – competição para dominar a tecnologia do futuro.	Nacionalização dos mercados de energia. Mais energia nuclear e fóssil como solução para a crise energética.
Preço do Carbono	A precificação do carbono está se expandindo globalmente. Maior aceitabilidade para instrumentos de precificação de carbono. Menos instrumentos políticos sobrepostos. Preço do carbono refletindo os custos marginais de redução.	Os subsídios na China e nos EUA pressionam a Europa. Outros instrumentos políticos que não a precificação do carbono, são preferidos em todos os mercados. Preços mais baixos do carbono.	As forças de extrema esquerda/direita ganham poder na Europa e em outros locais. Ambições climáticas fracas. Unidade da UE fraca. Mais instrumentos de política nacional e preços divergentes do carbono entre países.
Comércio global	Mercados globais em bom funcionamento, inversão da tendência de regionalização.	Grau crescente de regionalização (especialmente tecnologia), mas com algum comércio global (especialmente mercadorias) – precisa de tempo para estabelecer novas cadeias de valor.	Algum comércio global, mas diminuindo devido ao abastecimento doméstico e ao menor crescimento econômico.
Situação geopolítica	Estabilização do ambiente geopolítico globalmente nos próximos 1-2 anos.	Mundo de dois blocos (“tipo guerra fria”) – “competindo” no domínio da tecnologia e da ideologia.	Cada região concentrou-se nos problemas internos – a nacionalização como “solução”. Int. limitado. cooperação na questão climática.
Relações internas com o Ocidente	Relações fortes dentro da UE e entre os EUA e a UE. Protecionismo reduzido.	Unidade ideológica entre a UE e os EUA e desenvolvimento tecnológico compartilhado, mas algum protecionismo entre os dois (ou seja, IRA).	UE fraca – soluções mais nacionais e divergentes para a crise energética. Relações fracas entre a UE e os EUA (mais barreiras comerciais).
Relações China - Ocidente	Melhoradas a partir de hoje - Relações China-EUA/UE baseadas em “regras acordadas”, incluindo comércio extensivo.	Líder chinês do bloco “não-ocidental”. Comércio do qual ambas as partes se beneficiam, mas menos com bens sensíveis (por exemplo, alta tecnologia).	Menos comércio, tanto a China como o Ocidente mais voltados para dentro.
Restante do mundo	Economia forte alimentada pelo crescimento econômico global e pela cooperação.	Economia forte alimentada pelo crescimento econômico global e pela cooperação. Buscará a neutralidade e se beneficiará do comércio com ambos os blocos. A princípio transição mais lenta, mas depois beneficia-se de custos mais baixos de tecnologia.	Afetado por más perspectivas econômicas. Mais espaço para líderes estatais oportunistas assumirem um papel regional.

Low Emissions Scenario

Referências

- 1 IEA (2022). Renewable power's growth is being turbo-charged as countries seek to strengthen energy security: <https://www.iea.org/news/renewable-power-s-growth-is-being-turbocharged-as-countries-seek-to-strengthen-energy-security>

IEA (2022). World Energy Outlook 2022: Energy security in energy transition: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/energy-security-in-energy-transitions>
- 2 Global Electricity Review 2023 | Ember (ember-climate.org): <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
- 3 IEA (2023). World Energy Investment 2023: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- 4 UN environment programme (2022). Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework: https://www.unep.org/resources/kunming-montreal-global-biodiversity-framework?gclid=Cj0KCQjwpc-oBhCGARIsAH6ote-OCqGioXEMTXtiwCWx-qRbBnnT9XLFWGilos9CnRu5UMw4D-ida_loaAoFJEAJLw_wcB
- 5 WMO (2023). Earth had hottest three-month period on record, with unprecedented sea surface temperatures and much extreme weather: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/earth-had-hottest-three-month-period-record-unprecedented-sea-surface>
- 6 Wright, S. (2023). Looming insurance crisis could make the GFC 'look like a picnic': <https://www.smh.com.au/politics/federal/looming-insurance-crisis-could-make-the-gfc-look-like-a-picnic-20230807-p5duhz.html> (27.09.23)
- 7 IPCC rapport. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- 8 (Bruegel) (2023). European natural gas imports: <https://www.bruegel.org/dataset/european-natural-gas-imports> (06.08.23)
- 9 Statkraft (2023)
- 10 Enerdata (2023). EDF's power generation in France reached a record low in 2022: <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/edfs-power-generation-france-reached-record-low-2022.html>
- 11 IEA (2023). Europe's energy crisis: What factors drove the record fall in natural gas demand in 2022: <https://www.iea.org/commentaries/europe-s-energy-crisis-what-factors-drove-the-record-fall-in-natural-gas-demand-in-2022>
- 12 IEA (2023). Rapid progress of key clean energy technologies shows the new energy economy is emerging faster than many think - News - IEA: <https://www.iea.org/news/rapid-progress-of-key-clean-energy-technologies-shows-the-new-energy-economy-is-emerging-faster-than-many-think>

IEA (2023). Renewable Energy Market Update: https://iea.blob.core.windows.net/assets/63c14514-6833-4cd8-ac53-f9918c2e4cd9/RenewableEnergyMarketUpdate_June2023.pdf
- 13 BNEF (2023). Renewable Energy Investment Hits Record-Breaking \$358 Billion in 1H 2023: <https://about.bnef.com/blog/renewable-energy-investment-hits-record-breaking-358-billion-in-1h-2023/>
- 14 Ember (2023). Global Electricity Review 2023: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
- 15 IEA (2023). Europe's energy crisis: What factors drove the record fall in natural gas demand in 2022: <https://www.iea.org/commentaries/europe-s-energy-crisis-what-factors-drove-the-record-fall-in-natural-gas-demand-in-2022>
- 16 Ember (2023). EU fossil generation hits record low as demand falls: <https://ember-climate.org/insights/research/eu-fossil-generation-hits-record-low-as-demand-falls/>
- 17 IEA World Energy Investment 2023. World Energy Investment 2023: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- 18 IRENA (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- 19 IEA (2023). Renewable Energy Market Update: https://iea.blob.core.windows.net/assets/63c14514-6833-4cd8-ac53-f9918c2e4cd9/RenewableEnergyMarketUpdate_June2023.pdf

OECD (2023). Steel Market Developments: <https://www.oecd.org/industry/ind/steel-market-developments-Q2-2023.pdf>
- 20 IEA (2023). Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- 21 IEA (2023). Energy Technology Perspectives 2023: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>
- 22 Ibid
- 23 IEA (2023). Critical Minerals Market Review 2023: <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>
- 24 Attinasi, M-G., et al (2023). The economic costs of supply chain decoupling: <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scp-wps/ecb.wp2839~aaf35001a3.en.pdf>
- 25 IEA (2023). Renewable Energy Market Update Outlook for 2023 and 2024: https://iea.blob.core.windows.net/assets/63c14514-6833-4cd8-ac53-f9918c2e4cd9/RenewableEnergyMarketUpdate_June2023.pdf

TaiyangNews (2023). CPIA Raises Solar Installation Forecast For 2023: <https://taiyangnews.info/cpia-raises-solar-installation-forecast-for-2023/>
- 26 IEA (2023). Global EV Data Explorer: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>

- 27 PIIE, Hendrix, C.S. (2022). The Senate's climate change agreement will not secure US solar supply chains from China: <https://www.piie.com/blogs/realtime-economics/senates-climate-change-agreement-will-not-secure-us-solar-supply-chains>
- 28 Reuters (2023). Consultancy firms in China tested limits before Beijing's crackdown: <https://www.reuters.com/world/china/consultancy-firms-china-tested-limits-before-beijings-crackdown-2023-05-15/>
- 29 Reuters (2023). China's rare earths dominance in focus after it limits germanium and gallium exports: <https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-rare-earths-dominance-focus-after-mineral-export-curbs-2023-07-05/>
- 30 IMF (2023). Green Trade Tensions: <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2023/06/green-trade-tensions-kaufman-saha-bataille>
- 31 PV Tech, Rai-Roche, S. (2022). India releases new Production Linked Incentive scheme guidelines: <https://www.pv-tech.org/india-releases-new-production-linked-incentive-scheme-guidelines-for-solar-manufacturers/>
- 32 IEA (2023). The State of Clean Technology Manufacturing An Energy Technology Perspectives Special Briefing 2023: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0a421001-6157-436d-893c-c37eeab54967/TheStateofCleanTechnologyManufacturing.pdf>
- 33 Senate Democrats (2022). Summary: The Inflation Reduction Act of 2022: https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/inflation_reduction_act_one_page_summary.pdf
- 34 The White House (2023). Building A Clean Energy Economy: A Guidebook To The Inflation Reduction Act's Investments in Clean Energy and Climate Action: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>
- 35 Rhodium Group (2022). A Congressional Climate Breakthrough: <https://rhg.com/research/inflation-reduction-act/>
- 36 U.S. Department of The Treasury (2023). Treasury Department Releases Guidance to Boost American Clean Energy Manufacturing: <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy1477>
- 37 Berkeley Lab (2023). Grid connection requests grow by 40% in 2022 as clean energy surges, despite backlogs and uncertainty: <https://emp.lbl.gov/news/record-amounts-zero-carbon-electricity>
- 38 European Commission (2023). The Green Deal Industrial Plan: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_510
- 39 European Commission (2023). The Net-Zero Industry Act: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en
- 40 European Commission (2023). Critical Raw Materials Act: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en
- 41 IMF, Aiyar, S., et al.(2023). Goeconomic Fragmentation and the Future of Multilateralism (Shekhar Aiyar and Anna Ilyina, IMF) 2023: <https://www.imf.org/en/Publications/Staff-Discussion-Notes/Issues/2023/01/11/Geo-Economic-Fragmentation-and-the-Future-of-Multilateralism-527266>
- 42 World Bank Group (2023). Falling Long- Falling Long-Term Growth Prospects Edited by Trends, Expectations, and Policies Edited by Kose and Ohnsorge: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/fe0880d1-ffb4-430f-bab4-d3dbdda7470e/content>
- 43 Silver, L. (2022). European populist parties' vote share on the rise, especially on right: <https://www.pewresearch.org/short-reads/2022/10/06/populists-in-europe-especially-those-on-the-right-have-increased-their-vote-shares-in-recent-elections/>
- 44 Döphner, M. (2023), Decline, fear and the AfD in Germany: <https://www.politico.eu/article/afd-alternative-for-germany-deutschland-immigration-economy-decline-climate-change-right-wing-populism-opinion-mathias-dopfner/>
- 45 IMF (2023). WORLD ECONOMIC OUTLOOK IMF 2023: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2023/04/11/world-economic-outlook-april-2023>
- 46 IPCC (2023). New Challenges to Climate Policies June 2023 Gourinchas, Schwerhoff and Spillimbergo: <https://www.piie.com/sites/default/files/2023-06/2023-06-05-01spillimbergo.pdf>
- 47 Hafslund (2023). Vannmagasinene dempet flommen betydelig: <https://hafslund.no/nyheter/vannmagasinene-dempet-flommen-betydelig>
- 48 IMF (2023). World Economic Outlook: A Rocky Recovery – April 2023: <https://hafslund.no/nyheter/vannmagasinene-dempet-flommen-betydelig>
- 49 WMO (2023). Extreme weather is the “new norm”: <https://public.wmo.int/en/media/news/extreme-weather-new-norm>
- 50 IEA (2023). World Energy Investment 2023: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- 51 UNCTAD (2023). A climate finance goal that works for developing countries: <https://unctad.org/news/climate-finance-goal-works-developing-countries>
- 52 United Nations Climate Change (2022). What is the Triple Planetary Crisis: <https://unfccc.int/blog/what-is-the-triple-planetary-crisis>
- 53 UN environment programme (2022). Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework: https://www.unep.org/resources/kunming-montreal-global-biodiversity-framework?gclid=Cj0KCQjwpc-oBhCGARIsAH6ote-OCqGioXEMTxiwCWx-qRbBnnT9XLFWGilos9CnRu5UMw4D-ida_loaAoFJELw_wcB
- 54 IMF (2022). World Economic Outlook, October 2022: Countering the Cost-of-Living Crisis: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO>
- 55 IEA (2022). World Energy Outlook 2022: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- 56 Ibid
- 57 IEA (2023). Global EV Data Explorer: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
- 58 IEA (2023). Global EV Outlook 2023: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- 59 Ibid
- 60 IEA (2023). Global EV Data Explorer: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
- 61 Bloomberg (2023). China's Abandoned Electric Cars Pile Up After EV Boom Fueled by Subsidies: <https://www.bloomberg.com/features/2023-china-ev-graveyards/>

- 62 IEA (2022). World Energy Outlook 2022: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- 63 IEA (2023). Access to electricity – SDG7: Data and Projections: [https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity\(20.10.23\)](https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity(20.10.23))
- 64 IRENA (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- 65 IEA (2023). RePowerEU Plan : Joint European action on renewable energy and energy efficiency – Policies - IEA: <https://www.iea.org/policies/15691-repowereu-plan-joint-european-action-on-renewable-energy-and-energy-efficiency>
- 66 Euractiv, Taylor, K. (2023). North Sea countries aim for 300 GW of offshore wind energy by 2050: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/north-sea-countries-aim-for-300-gw-of-offshore-wind-energy-by-2050/>
- 67 The White House (2021). FACT SHEET: Biden Administration Jumpstarts Offshore Wind Energy Projects to Create Jobs: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/29/fact-sheet-biden-administration-jump-starts-offshore-wind-energy-projects-to-create-jobs/>
- 68 Liu, K. (2023). Taiwan offshore wind development faces headwinds: <https://english.cw.com.tw/article/article.action?id=3435> (18.10.2023)
- 69 Presidência da República (2022). DECRETO Nº 10.946, DE 25 DE JANEIRO DE 2022: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/Decreto/D10946.htm
- Colombia Potencia de la Vida (2022). Offshore wind roadmap for Colombia: <https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-eolica-offshore/src/document/Colombia%20Offshore%20Wind%20Roadmap%20VE.pdf>
- 70 Financial Times (2023). Wind sector faces supply chain crunch this decade, industry body warns: <https://www.ft.com/content/f324be0d-191e-4943-97fd-51a8d46e286c> (18.10.23)
- 71 Durakovic, A. (2023). Scale Up Smarter, Not Harder – Why Offshore Wind Ambitions Can Be Met More Efficiently if Turbine Growth Is Paused: <https://www.offshorewind.biz/2023/08/28/scale-up-smarter-not-harder-why-offshore-wind-ambitions-can-be-met-more-efficiently-if-turbine-growth-is-paused/>
- 72 IEA (2022). World Energy Outlook 2022: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- 73 World Nuclear Association (2020). Financing Nuclear Energy: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/financing-nuclear-energy.aspx> (20.10.23)
- 74 World Nuclear Association (2023). World Uranium Mining - World Nuclear Association (world-nuclear.org): <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx> (20.10.23)
- 75 Ritchie, H. & Rosado, P. (2020). Nuclear Energy - Our World in Data: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy#safety-of-nuclear-energy>
- 76 Bloomberg (2021). China Climate Goals Hinge on \$440 Billion Nuclear Power Plan to Rival U.S: <https://www.bloomberg.com/news/features/2021-11-02/china-climate-goals-hinge-on-440-billion-nuclear-power-plan-to-rival-u-s>
- Statista (2023). Global nuclear power capacity 2022: <https://www.statista.com/statistics/263947/capacity-of-nuclear-power-plants-worldwide/>
- 77 Statista (2023). Nuclear reactors under construction worldwide 2023: <https://www.statista.com/statistics/513671/number-of-under-construction-nuclear-reactors-worldwide/>
- 78 IEA (2023). Net Zero by 2050 – Analysis - IEA: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- 79 BNEF (2023). A Power Grid Long Enough to Reach the Sun Is Key to the Climate Fight | BloombergNEF (bnef.com): <https://about.bnef.com/blog/a-power-grid-long-enough-to-reach-the-sun-is-key-to-the-climate-fight/>
- 80 BNEF (2023). Grid Connection Queues Threaten Europe's Net-Zero Goals: <https://www.bnef.com/insights/30897?context=eyJjb250ZW50VHlwZSI6Im-luc2lnaHQiLCJyZWdpb24iOi0tdLCjZWNOb3li0lSiM-mQ2MzdYTg0MTEyZTE3OCJldLCjhdXRob3li0ltdLCJpbmNp-Z2h0LXR5cGUiOi0tdfQ==>
- 81 IEA (2023). According to the IEA Energy Technology Perspectives 2023 report: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- 82 Gridradar (2023). Real-time behaviour of power frequency: <https://gridradar.net/en/mains-frequency> (20.10.23)
- 83 IPCC (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 (ipcc.ch): <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- 84 McGreevy, N. (2020). Scientists Project Precisely How Cold the Last Ice Age Was | Smart News| Smithsonian Magazine: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/ice-age-temperature-science-how-cold-180975674/> (20.10.23)
- 85 United Nations Climate Change. The Paris Agreement | UNFCCC: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- 86 IPCC (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 (ipcc.ch): <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- 87 Climate Action Tracker (2023). CAT Climate Target Update Tracker: <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker-2022/> (20.10.23)
- 88 Graphs were created in collaboration with by Glen Peters, Research Director, CICERO, and taken from AR6 Scenarios Database hosted by IIASA: <https://iiasa.ac.at/mod-els-and-data/ar6-scenario-explorer-and-database>. Other sources: Statkraft analysis, IEA WEO22
- 89 IEA (2023). World Energy Outlook 2022 – Analysis - IEA: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- 90 European Scientific Advisory Board on Climate Change (2023). Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030–2050 (europa.eu): <https://climate-advisory-board.europa.eu/reports-and-publications/scientific-advice-for-the-determination-of-an-eu-wide-2040>
- 91 IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- IEA (2021). Net zero by 2050: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- BNEF (2021). New Energy Outlook 2021: Data Viewer (1.0.3): <https://www.bnef.com/flagships/new-energy-outlook>

